



Évaluation des conséquences d'aménagements d'infrastructures sur les déplacements d'animaux. Définition et expérimentation d'un modèle de simulation agent

Laurence Jolivet, Marianne Cohen, Anne Ruas

► To cite this version:

Laurence Jolivet, Marianne Cohen, Anne Ruas. Évaluation des conséquences d'aménagements d'infrastructures sur les déplacements d'animaux. Définition et expérimentation d'un modèle de simulation agent. *Cybergeo: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2015, 10.4000/cybergeo.26767 . hal-01183559

HAL Id: hal-01183559

<https://hal.science/hal-01183559>

Submitted on 10 Aug 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Laurence Jolivet, Marianne Cohen et Anne Ruas

Évaluation des conséquences d'aménagements d'infrastructures sur les déplacements d'animaux. Définition et expérimentation d'un modèle de simulation agent

Avertissement

Le contenu de ce site relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive de l'éditeur.

Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner l'éditeur, le nom de la revue, l'auteur et la référence du document.

Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

revues.org

Revues.org est un portail de revues en sciences humaines et sociales développé par le Cléo, Centre pour l'édition électronique ouverte (CNRS, EHESS, UP, UAPV).

Référence électronique

Laurence Jolivet, Marianne Cohen et Anne Ruas, « Évaluation des conséquences d'aménagements d'infrastructures sur les déplacements d'animaux. Définition et expérimentation d'un modèle de simulation agent », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 712, mis en ligne le 21 février 2015, consulté le 13 mai 2015. URL : <http://cybergeo.revues.org/26767> ; DOI : 10.4000/cybergeo.26767

Éditeur : CNRS-UMR Géographie-cités 8504

<http://cybergeo.revues.org>

<http://www.revues.org>

Document accessible en ligne sur :

<http://cybergeo.revues.org/26767>

Document généré automatiquement le 13 mai 2015.

© CNRS-UMR Géographie-cités 8504

Laurence Jolivet, Marianne Cohen et Anne Ruas

Évaluation des conséquences d'aménagements d'infrastructures sur les déplacements d'animaux. Définition et expérimentation d'un modèle de simulation agent

Introduction

- 1 Les déplacements de la faune constituent un élément important à prendre en compte lors de la définition de mesures de protection de l'environnement. Ces déplacements participent au bon fonctionnement des écosystèmes et au maintien de la biodiversité. Les projets d'aménagement du territoire, et en particulier la construction d'infrastructures de transport terrestre, ont des conséquences en termes de modifications de l'espace dans lequel vivent les animaux qu'il convient d'évaluer en amont de leur mise en œuvre. Pour cela, il est nécessaire de comprendre l'influence des éléments du paysage sur les déplacements et de formaliser cette influence en proposant un modèle. Les modèles peuvent correspondre à une représentation attachée à une espèce et à la description de son fonctionnement biologique. Ils peuvent aussi intégrer une modélisation de l'espace générique et paramétrable en fonction des espèces animales. Notre travail vise le deuxième objectif. Nous proposons une modélisation des déplacements qui prenne en compte une description commune de l'espace, qui puisse s'adapter facilement à la diversité des comportements mais qui ne détaille pas tous les processus intervenant dans les choix de direction. Pour cela, nous nous appuyons sur des connaissances relatives aux comportements spatiaux de plusieurs espèces animales. L'implémentation de notre modèle et le lancement de simulations de déplacements nous permettent ensuite d'adopter une approche critique sur les résultats et sur leur utilisation dans l'évaluation des effets de différents types d'aménagements du territoire.

1. Contexte des études sur les déplacements de la faune et nos objectifs en modélisation

- 2 La connaissance des déplacements de la faune est issue d'observations, en nombre limité, qui permettent de mieux comprendre l'influence des éléments du paysage dans le cadre propre à chaque étude. Nous présentons certaines de ces études en lien avec un aménagement du territoire, qui soit constitue un obstacle, soit conserve les possibilités de parcours de l'espace par les animaux. Nous énonçons ensuite nos objectifs de modélisation des relations entre le paysage et les déplacements.

1.1. L'aménagement du territoire et son influence sur la faune sauvage

1.1.1. Les effets des obstacles sur les déplacements d'animaux

- 3 La diminution ainsi que la fragmentation des habitats favorables sont provoquées par la disparition de certains milieux et par la création d'obstacles. L'urbanisation et l'occupation humaine intense obligent certaines espèces animales à trouver de nouveaux lieux de vie ou à s'adapter (Cohen, 2006 ; McKinney, 2006). La fragmentation des zones boisées, composant une partie ou l'ensemble de l'habitat de nombreuses espèces, peut être néfaste (Merger, 2007), même si elle peut favoriser de façon inattendue d'autres espèces (Ethier *et al.*, 2011). Les obstacles et les dérangements peuvent gêner les animaux dans leurs déplacements quotidiens. Les infrastructures de transport comme les routes et les voies ferrées sont des barrières physiques par l'aménagement des bas-côtés, leurs revêtements et le trafic associé. Les routes sont évitées par plusieurs espèces animales (McGregor *et al.*, 2006). Les obstacles

peuvent aussi limiter les échanges entre les populations et les fragiliser. Certains éléments linéaires naturels mais aménagés, tels les grands cours d'eau, entraînent la formation de sous-populations différentes, par exemple constaté pour les chevreuils par Cosson *et al.* (2008). Les routes entraînent une augmentation du taux de mortalité comme lors des migrations annuelles (exemple des batraciens : Marsh *et al.*, 2005).

1.1.2. Les mesures de protection de la faune

- 4 La préservation de la faune sauvage repose sur l'existence de lieux de vie favorables aux espèces et sur l'accès à des zones de ressources. Les politiques actuelles de protection des espèces prévoient de préserver des habitats de qualité et les moins fragmentés possibles, tout en conciliant les besoins et les capacités propres à de nombreuses espèces. Les mesures doivent également prendre en compte les particularités des espaces dans lesquels elles sont appliquées.
- 5 Pour pallier les effets négatifs des activités humaines sur les écosystèmes et notamment sur la faune, les premières approches ont consisté à protéger certains sites de toute influence extérieure (Veyret et Simon, 2006). Des réserves naturelles ont été créées, cernées par des frontières plus ou moins hermétiques. Elles ont pour but de protéger des paysages, une faune et une flore remarquables. Ces réserves pouvant s'apparenter à des îlots de biodiversité, la question s'est posée de la pertinence de leur emprise et de leur distribution géographique (MacArthur et Wilson, 1967). Pour certaines espèces animales, la superficie des zones protégées demeure insuffisante par rapport aux distances de déplacement et à la taille des domaines vitaux, c'est-à-dire l'espace répondant aux besoins d'un animal (Héritier *et al.*, 2007). Les déplacements de migrations dépassent souvent les frontières des parcs (Fryxell *et al.*, 2008). La mise en place de réseaux de zones favorables est aujourd'hui privilégiée en complément des aires protégées, afin de faciliter la circulation des animaux. Le principe des réseaux écologiques est de préserver la continuité des milieux naturels afin d'assurer les mouvements d'individus et de populations entre des taches d'habitat, aussi appelées zones nodales (Bonnin, 2008). Ces taches sont reliées entre elles par des corridors qui peuvent représenter un lieu de vie ou un lieu de passage bref.
- 6 Les objectifs de conservation des espèces via des réseaux écologiques peuvent néanmoins être en contradiction avec certains projets d'aménagement, comme ceux accentuant l'étalement urbain ou ceux consacrés à la construction d'infrastructures de transport. Ces projets sont susceptibles d'empiéter sur les domaines vitaux des espèces et de les contraindre dans leurs déplacements. Le code de l'environnement prévoit la réalisation d'études d'impact en amont des projets d'aménagement notamment pour évaluer leurs répercussions en termes de fragmentation des habitats (MEDDTL, 2009). Ces études préalables sont menées pour tenter de prévoir et de limiter les conséquences des nouvelles constructions et plus largement des changements du paysage. Les dynamiques de la faune et de la flore sont ainsi prises en compte dans les politiques d'aménagement. Elles sont au cœur du Grenelle de l'Environnement par la définition des Schémas régionaux de cohérence environnementale (SRCE) et de la Trame verte et bleue (TVB) sur l'ensemble du territoire français. Cette dernière mesure vise le maintien de la biodiversité par la conservation et la création de corridors écologiques, parties intégrantes des réseaux écologiques. Afin d'identifier ces réseaux, l'occupation du sol est cartographiée puis caractérisée (Amsellem *et al.*, 2010). Les zones urbaines font par exemple l'objet d'études particulières quant aux contraintes du bâti et de la densité du réseau routier (Pellissier *et al.*, 2012), ainsi que des rapports entre l'occupation humaine et la préservation de la nature (Blanc *et al.*, 2012). La TVB correspond à une préoccupation envers des espèces non seulement emblématiques mais également plus communes, faisant partie de la nature ordinaire (Godet, 2010). Elle a pour rôle d'intégrer les besoins de plusieurs espèces et des déplacements de types différents sur de courtes et de longues distances.

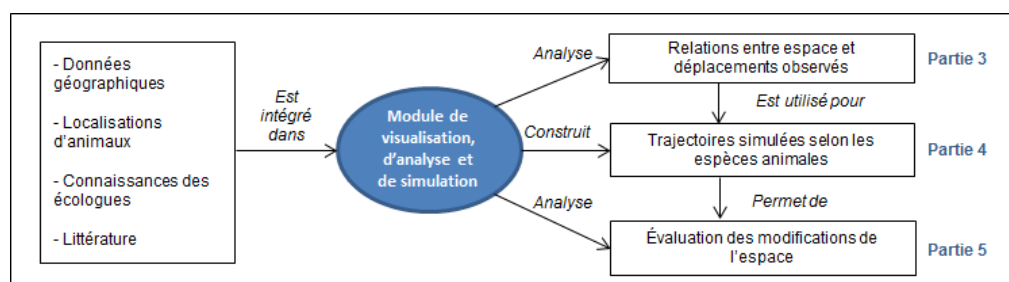
1.2. Objectif de recherche et approche

- 7 Notre objectif principal est de *modéliser l'espace tel qu'il est perçu par les animaux lors de leurs déplacements pour ensuite évaluer les effets des aménagements*. Nous cherchons à qualifier le paysage par son influence sur les choix de destination et sur les trajets réalisés selon les espèces animales considérées. Cela nécessite de connaître les lieux de déplacement

de la faune : les éléments qui font obstacle, ceux qui favorisent le passage, les lieux attracteurs et les lieux évités. Il s'agit de *déterminer l'espace fonctionnel*, c'est-à-dire l'espace qui est perçu et effectivement utilisé par les animaux (Burel et Baudry, 1999). Pour cela, des données sur les déplacements des animaux sont nécessaires ainsi que des données de description de leur environnement spatial. Nous nous plaçons dans le contexte d'une modélisation des déplacements à grande échelle spatiale et temporelle. Nous cherchons également à identifier si l'utilisation de données géographiques à grande échelle spatiale est intéressante pour interpréter l'influence de l'espace sur les déplacements et pour représenter les effets d'aménagements, notamment les données de la BD TOPO®. La caractérisation de l'espace tel qu'il est utilisé lors des déplacements est ainsi décrite par ces bases de données. Notre hypothèse de travail à laquelle nous souhaitons apporter des éléments de confirmation est la suivante : *il est possible de simuler des trajectoires d'animaux à partir d'une modélisation de leurs déplacements quotidiens et à partir de données de description de l'espace à grande échelle*.

- 8 De façon à couvrir une large gamme de situations, nous avons choisi de comparer plusieurs espèces et espaces : le renard en milieu périurbain, le chevreuil et le cerf en milieu forestier (décrit en partie 2). La considération de plusieurs cas d'étude permet une comparaison interspécifique entre les animaux suivis ainsi qu'une analyse de la variabilité des comportements de déplacement entre les individus d'une même espèce (partie 3). Les résultats des analyses des cas sont associés aux connaissances issues de la littérature afin de proposer une modélisation de l'espace et des déplacements d'animaux (partie 4). Nous nous appuyons sur ce modèle pour simuler des trajectoires en considérant les contraintes de l'espace et en adaptant les paramètres de simulation selon l'espèce, puis pour simuler les effets d'aménagements (partie 5). Compte-tenu des difficultés du suivi d'un grand nombre d'animaux, un avantage de la simulation est de générer des déplacements dans plusieurs sites géographiques en modélisant les comportements connus des espèces animales. Le modèle de simulation permet de mieux comprendre les relations entre l'espace et les déplacements. Il offre la possibilité de tester nos résultats obtenus par analyse concernant les contraintes spatiales aux déplacements. Les conséquences d'aménagements peuvent être estimées par la traduction des modifications de l'espace dans les bases de données géographiques et par l'analyse des déplacements construits sur ce nouvel espace. La figure 1 présente les principales étapes de notre approche. Le module de visualisation, d'analyse et de simulation concerne les relations entre les déplacements et l'espace pour différentes espèces animales.

Figure 1 : Approche pour simuler des trajectoires et des conséquences d'aménagements.



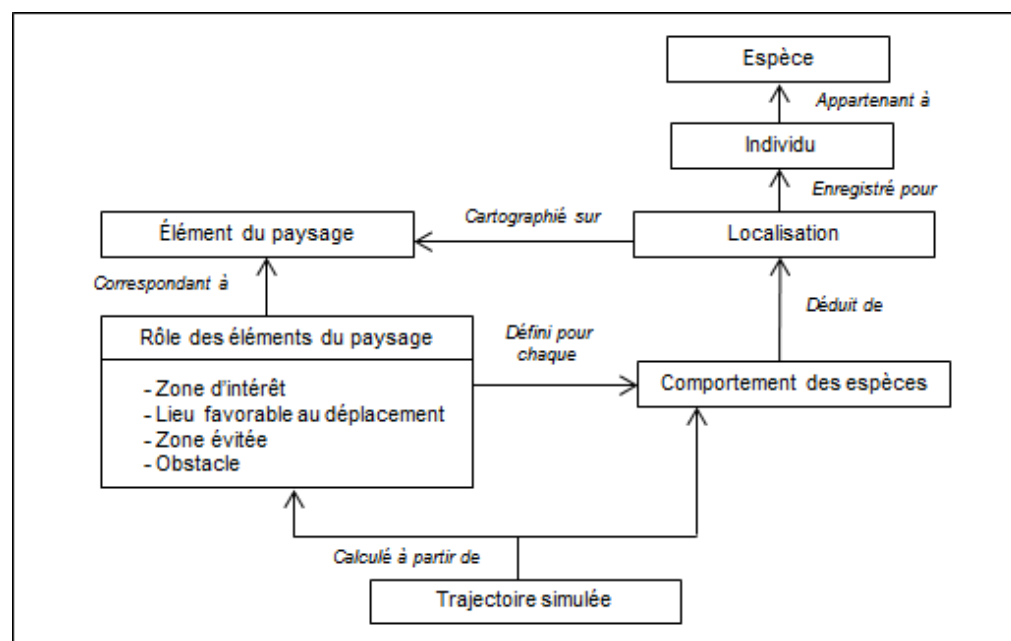
- 9 Nous revenons dans la discussion en partie 6 sur les apports et les limites des données disponibles pour comprendre puis intégrer les besoins de la faune dans des projets d'aménagements. Nous employons par ailleurs dans le même sens les termes et expressions « espace » et « environnement spatial » de même que « élément spatial » et « éléments du paysage ». Le mot « déplacement » est consacré à l'action physique des individus alors que la « trace » correspond à la forme construite des déplacements à partir de localisations connues. Nous parlons de « trajectoire » lorsque nous associons le temps à la trace.

2. La prise en compte de la variabilité des comportements à travers plusieurs terrains et plusieurs espèces animales

2.1. L'espace fonctionnel

10 Notre but étant de simuler des déplacements, nous nous focalisons sur la façon dont les éléments du paysage sont perçus et parcourus par les animaux. Selon les espèces, ils peuvent représenter des lieux d'intérêt et/ou de passage par leur nature ou par leur répartition, qui font partie de l'espace fonctionnel utilisé par les animaux. Au contraire, certains éléments limitent les déplacements et sont des obstacles plus ou moins infranchissables selon les espèces. En effet chaque espèce animale et à plus forte raison chaque individu possède une perception propre de l'espace. Les qualifications de l'espace perçu par les animaux sont diverses. Il peut s'agir des « mondes animaux » énoncés par von Uexküll (1934) : les espèces animales ont une perception propre de leur environnement au sens large (spatial, vivant, temporel) et elles lui donnent une signification différente même si cet environnement est le même. Tolman (1948) mentionne la représentation mentale par les animaux des éléments de l'espace, de leur intérêt et de leurs relations, par ce qu'il appelle une carte cognitive. Cette carte peut évoluer avec l'âge de l'individu, comme le suggèrent Papastamatiou *et al.* (2011). Les animaux peuvent aussi s'aider de points de repère pour se diriger, en plus d'une représentation absolue de l'espace (Gould, 2002). Ces théories relèvent de l'éthologie et des connaissances en cognition animale. Nous souhaitons utiliser une modélisation simplifiée de la représentation de l'espace, car nous ne modélisons pas les mécanismes de perception. Seul le choix global de direction pris par un individu nous intéresse. Nous proposons ainsi une caractérisation générique de l'espace : les éléments du paysage qui favorisent les déplacements et ceux qui les freinent, ainsi que les zones d'intérêt propices à la présence des espèces et constituant donc des motivations aux déplacements, comme illustré en figure 2.

Figure 2 : Caractérisation de l'espace fonctionnel et des déplacements de la faune.

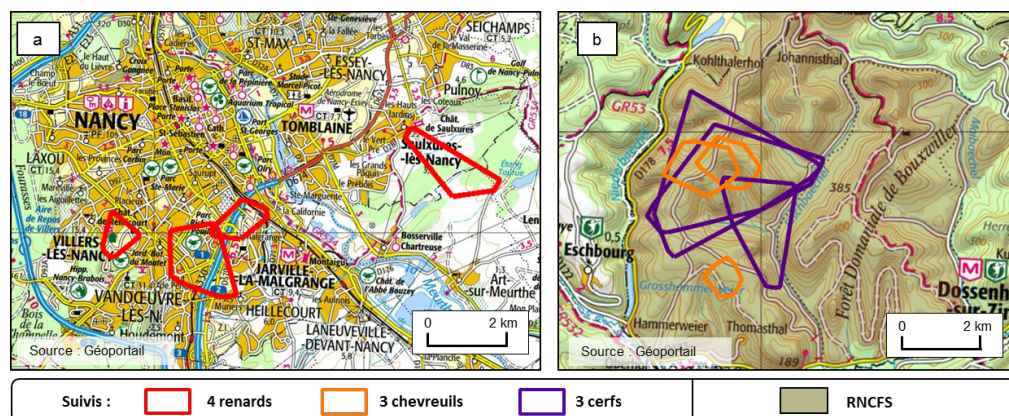


11 Dans cet article, nous définissons le contenu de l'espace fonctionnel pour plusieurs espèces. Les cas d'étude ont été sélectionnés en fonction de l'adéquation entre la taille des animaux et les éléments de l'espace contenus dans les bases de données géographiques et pouvant influencer les déplacements. Notre choix s'est arrêté sur des mammifères terrestres de taille moyenne à grande, de sorte que les analyses des relations entre déplacements et espace soient cohérentes avec l'échelle des données géographiques et que l'espace fonctionnel puisse être identifié. La récolte de données de télémétrie étant coûteuse, les données existantes sont rares, ce qui limite aussi les cas d'étude.

2.2. Présentation des deux terrains d'étude et des trois espèces animales

- 12 Les terrains d'étude correspondent à des sites où des organismes spécialisés mènent des suivis de la faune. Le premier, à la périphérie de Nancy (département de Meurthe-et-Moselle), a fait l'objet d'un travail de thèse par E. Robardet (2007) sur les renards (*Vulpes vulpes*) (figure 3.a). Les individus, trois mâles et une femelle, se répartissent sur plusieurs espaces se superposant peu ou aucunement : un espace de type périurbain autour de Nancy, avec une forte densité de bâtiments et de voies de communication, et un espace plus éloigné de la ville en limite d'un milieu agricole entrecoupé de bois. Or, on sait que le renard roux s'adapte à un environnement fortement anthropisé et que son régime alimentaire varie en fonction des saisons et des ressources contenues dans son habitat (Poulle, 1991). Les déplacements des renards périurbains s'étendent généralement sur une surface moindre que ceux des renards de milieu rural où la nourriture est a priori en moins grande abondance et davantage dispersée (Robardet, 2007). Le choix de cette diversité de situation nous permettra de vérifier la façon dont les renards s'adaptent à des milieux différents (cas des espèces dites généralistes).
- 13 Le second site est localisé dans la Réserve de chasse et de faune sauvage (RNCFS) de La Petite Pierre, au sein du Parc naturel régional des Vosges du Nord dans le Bas-Rhin (figure 3.b). C'est un lieu d'étude de l'ONCFS (Saïd, 2008). Le paysage est forestier, dominé par des essences de feuillus, hêtres et chênes, avec également des résineux comme des sapins (Storms *et al.*, 2004). Le relief est vallonné et l'altitude est comprise entre 190 et 410 mètres. La réserve reste libre d'accès mais elle n'est pas habitée et la circulation des véhicules y est interdite. Les dérangements sont donc limités aux passages de randonneurs et aux activités de gestion et de suivi. Trois femelles chevreuil (*Capreolus capreolus*) et trois femelles de l'espèce cerf élaphe (*Cervus elaphus*) sont suivis par GPS. Ces deux espèces de la famille des cervidés sont des herbivores ruminants. Ils exercent une pression sur la végétation herbacée et ligneuse. Le cerf, plus grand que le chevreuil (hauteur au garrot de 1 m pour les biches contre 70 cm en moyenne pour les chevrettes (ONCFS, 2013), se déplace généralement sur des distances plus longues et occupe des domaines vitaux plus étendus.

Figure 3 : Carte des sites d'étude et des espaces parcourus individuels estimés par enveloppe convexe : a) les 4 renards suivis par l'Anses en périphérie de Nancy (Anses) ; b) les 3 chevreuils et les 3 cerfs étudiés par l'ONCFS dans la RNCFS de La Petite Pierre.



- 14 Les deux cas d'étude présentent l'intérêt d'inclure trois espèces aux besoins différents correspondant à une appréhension de l'espace particulière. Cela éclaire sur les diverses motivations et les rythmes des déplacements. La comparaison sur un même site des deux espèces de cervidés est intéressante pour répondre à notre objectif.

2.3. Les spécifications des points GPS et des données géographiques

- 15 Les déplacements des animaux sont connus à partir d'une succession de points enregistrés par des colliers GPS. Les protocoles de mesure sont propres aux cas d'étude. Concernant les renards, la fréquence temporelle des relevés est en moyenne de 15 minutes. Pour les cervidés, les localisations ont été enregistrées toutes les 5 minutes. Certains points manquent, compte

tenu des aléas d'acquisition. La durée moyenne des enregistrements pour un individu varie entre une et cinq fois 24 heures (tableau 1). Nous n'attendons pas de cet échantillon des résultats statistiques sur l'influence de l'espace sur les déplacements des espèces. L'objectif, plus modeste, est de confirmer ou d'infirmer des tendances ainsi que d'identifier les données pertinentes à intégrer au modèle de simulation. Ceci permet également d'identifier des comportements de déplacement et l'existence de mode d'utilisation de l'espace par les individus.

Tableau 1 : Spécifications des points GPS relevés sur les animaux.

| Espèce | Nombre d'individus | Site d'étude | Type de milieu | Pas de temps des localisations | Nombre total de relevés | Durée moyenne des suivis |
|-----------|--------------------|--------------|----------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Renard | 4 | Nancy | Périurbain | 15 min. | 675 | 1 jour |
| Chevreuil | 3 | Vosges | Forestier | 5 min. | 4000 | 5 jours |
| Cerf | 3 | Vosges | Forestier | 5 min. | 2500 | 4 jours |

- 16 Les données de description de l'espace sont issues de la BD TOPO® qui est organisée en thèmes : hydrographie, végétation, réseaux de transport, bâti, relief. Des informations attributaires complètent la géométrie : le type des routes et des indications sur le trafic, la fonction des bâtiments, les essences forestières principales. Ces données à grande échelle, de précision métrique, permettent de considérer l'espace comme une référence sur laquelle les localisations des individus sont cartographiées. Les localisations GPS ont une précision plus faible, estimée à moins de 20 mètres. Selon les espèces et les sites, les informations contenues dans les bases de données géographiques décrivent l'occupation du sol dans l'ensemble de la surface du site d'étude – cas de la forêt dans la RNCFS –, alors que dans le milieu périurbain les zones arborées, les bâtiments et les routes ont des emprises plus petites entre lesquelles des zones restent sans description. D'autres sources sont exploitées pour améliorer la description des sites d'étude et l'interprétation des déplacements. En milieu forestier, la base Carte forestière est utilisée, et en périphérie urbaine, le Registre parcellaire graphique décrit les parcelles agricoles et les prairies.

3. L'analyse des déplacements observés pour caractériser l'influence de l'espace

- 17 Les données des localisations des animaux sont analysées en fonction de leur environnement spatial afin de modéliser une appréhension réaliste de l'espace lors des déplacements. Il s'agit d'identifier prioritairement des préférences spatiales, c'est-à-dire les lieux fréquentés par les animaux et les lieux qu'ils semblent éviter, ceci à partir des localisations connues qui sont des informations ponctuelles. En vue des simulations de trajectoires, nous supposons que ces préférences sont conservées lors des déplacements qui sont spatialement continus. Nous posons également comme postulat que les préférences spatiales observées lors de déplacements quotidiens dans un espace habituellement parcouru ont tendance à être conservées par les animaux lors de déplacements sur des distances et sur des durées plus longues (sauf pour des déplacements de migration). Nous cherchons à extraire automatiquement des données géographiques, les lieux attracteurs et les lieux de passage qui attirent les individus, la distinction entre les deux s'appuyant sur une interprétation a posteriori.

3.1. Les rythmes de déplacement en lien avec les activités

3.1.1. Estimation des distances

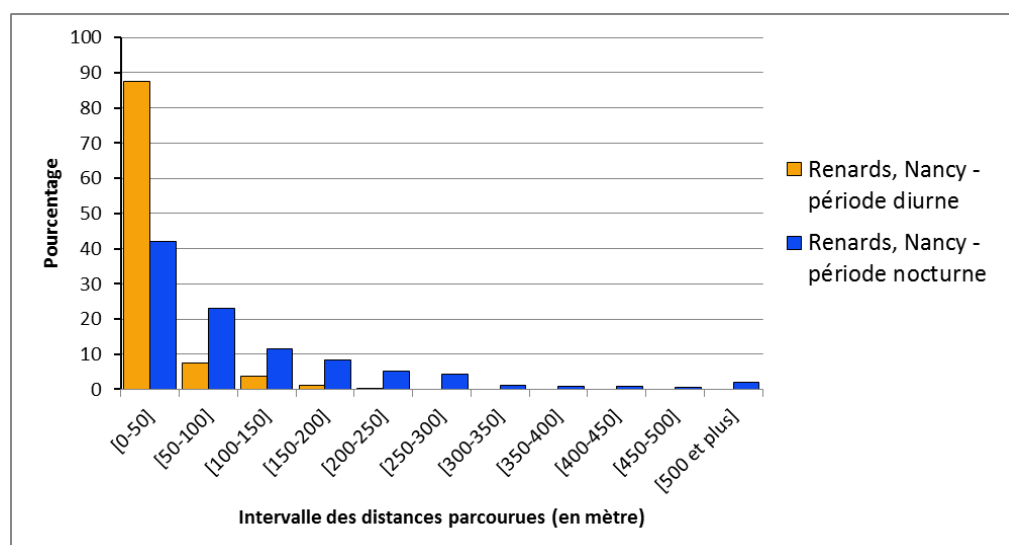
- 18 Une connaissance intéressante à inclure dans le modèle est le rythme des déplacements. Notre objectif reste l'influence de l'espace sur les déplacements ; cependant, la prise en compte du rythme ajoute du réalisme aux trajectoires simulées. Alors que les localisations ponctuelles indiquent une situation non ambiguë en coordonnées spatiales et dans le temps malgré une marge d'imprécision, les trajectoires complètes ne peuvent être qu'interpolées ou reconstruites. Les points sont interpolés en traces linéaires afin d'obtenir une représentation

continue des déplacements sans hypothèse préalable sur les chemins empruntés. Nous calculons les distances parcourues à partir de cette interpolation linéaire. Les valeurs des distances ainsi que des vitesses de déplacement sont minimisées car il est possible que les individus effectuent des pauses entre deux localisations successives et donc se déplacent rapidement puis s'arrêtent.

3.1.2. Les renards en milieu périurbain

19 Nous représentons en figure 4 la distribution des distances parcourues estimées pour le cas d'étude des quatre renards à Nancy. Le test du χ^2 indique que les courtes distances sont significativement surreprésentées en période diurne (moins de 50 m pendant 15 min) et les grandes en période nocturne (plus de 50 m). Pour cette espèce et en milieu urbanisé, la distinction est en effet importante entre les activités effectuées pendant le jour et celles pendant la nuit (Meia, 1994). Les faibles déplacements le jour correspondent au repos dans des gîtes (terriers, lieux cachés par la végétation, voir figure 5). La nuit, les renards peuvent parcourir plusieurs kilomètres afin de trouver de la nourriture. Ces déplacements peuvent s'effectuer pendant plusieurs heures consécutives loin des gîtes de repos, dans nos échantillons entre 20 h et 4 h du matin, avec une vitesse moyenne de 2,2 km/h.

Figure 4 : Les distances parcourues estimées pour les renards en milieu périurbain. Distinction entre la période diurne et la période nocturne. La fréquence moyenne des relevés est 15 min.



3.1.3. Les cervidés en milieu forestier

20 Pour les chevreuils et les cerfs, la distinction entre les périodes diurnes et nocturnes n'est pas évidente à partir des données. Nous observons par contre des alternances régulières au cours d'une période de 24 h entre des déplacements rapides et des déplacements lents ou nuls. Les individus des deux espèces ont des phases de repos dans des zones de refuge, a priori dissimulées par de la végétation dense (Baltzinger, 2003). Ils ont également des phases d'alimentation pendant lesquelles les individus se déplacent dans des zones restreintes lorsqu'ils fourragent, et sur de plus grandes distances lorsqu'ils changent de lieux d'exploitation. Les chevreuils s'alimentent notamment toutes les trois à six heures (Saïd *et al.*, 2005). Dans nos cas d'étude, les chevreuils se déplacent à une vitesse moyenne de 350 m/h et les cerfs à 450 m/h.

3.2. Le contexte spatial des localisations

21 Le comportement des individus suivis dépend de leur espèce ainsi que du site. Selon l'espèce, les animaux ont des besoins et en particulier un régime alimentaire qui les amènent à se déplacer sur des espaces plus ou moins grands. La composition du site d'étude peut aussi influencer les distances parcourues ainsi que la situation des animaux par rapport aux types d'occupations du sol.

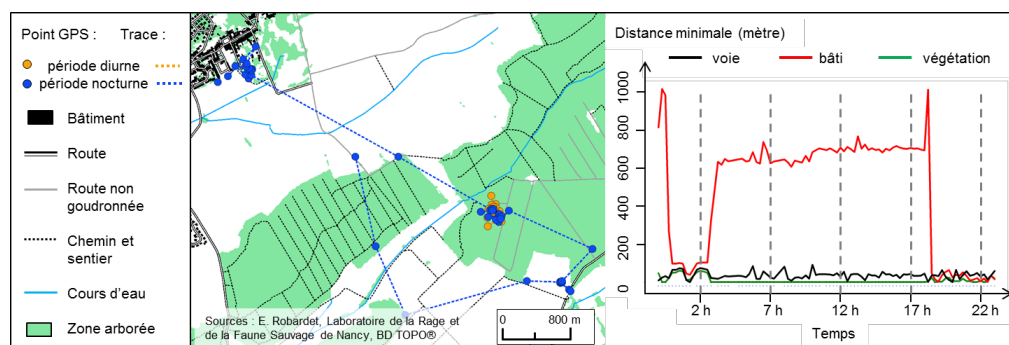
3.2.1. L'étendue et la composition des espaces parcourus

- 22 Nous étudions les espaces parcourus par les animaux : leur superficie et leur contexte spatial. Les espaces parcourus sont estimés en calculant l'enveloppe convexe de l'ensemble des points GPS (voir figure 3). Ces espaces peuvent être assimilés aux domaines vitaux lorsque les suivis couvrent une durée de plusieurs jours. Nos échantillons de données concernent néanmoins un nombre restreint de jours et nous préférons le terme d'espace parcouru. Concernant les renards, la superficie moyenne des enveloppes convexes par individu suivi pendant une journée est de 1 km². Les chevreuils se déplacent en moyenne par jour sur moins de 0,1 km² et les cerfs sur environ 0,6 km².
- 23 L'étude de la composition des espaces parcourus permet de se concentrer dans la suite des analyses sur les informations spatiales qui jouent potentiellement un rôle. Dans le cas des renards, les quatre individus vivent dans des sites en périphérie de zone urbaine, allant de faiblement à densément urbanisé. Dans l'ordre, l'espace parcouru du renard 2 est faiblement urbanisé, puis viennent ceux des renards 3, 1 et 4. Le bâti est plus ou moins présent dans les espaces parcourus par les individus, entre 27 et 310 bâtiments par km². Ce bâti est associé à une densité de routes comprise entre 18 et 271 par km². La présence de zones arborées est plus importante dans deux des espaces parcourus, avec respectivement 39,8 % et 37,9 % de la superficie totale pour les renards 2 et 3, contre 23,2 % et 25,9 % pour les renards 1 et 4. Nous avons donc opté pour des analyses spatiales par individu.
- 24 Pour les cervidés en milieu forestier, le bâti est quasiment absent des espaces parcourus. Les voies de transport sont des sentiers ou des routes forestières où la circulation est réglementée. Le couvert arboré est quasi continu, à l'exception d'une clairière de 1 km². Les peuplements forestiers sur le site d'étude sont composés de feuillus (55 %), de conifères (22 %) et de forêts mélangées (23 %). La composition des espaces parcourus montrerait une préférence envers les peuplements de feuillus, qui représentent respectivement 69 % et 70 % des forêts parcourues par les chevreuils et les cerfs. Les conifères semblent par contre évités, représentant 7 % des espaces parcourus par les chevreuils et de 12 % par les cerfs.

3.2.2. La situation des animaux par rapport aux éléments du paysage

- 25 Le contexte spatial de la situation des animaux est précisé par le calcul des distances aux différents thèmes géographiques en fonction du temps. La chronologie et la durée liées à l'espace sont des données intéressantes car elles permettent de déterminer si une occupation du sol est exploitée (repos, nourriture) ou si elle est seulement traversée.
- 26 Nous présentons en figure 5 le suivi du renard 2. La cartographie des points GPS est mise en correspondance avec les distances minimales aux voies de transport, aux bâtiments et aux zones arborées. Les localisations du renard sont éloignées des constructions humaines pendant la majeure partie de la journée entre 3 h du matin et 18 h, alors que c'est l'inverse pendant la période nocturne. La distance minimale aux voies est en moyenne égale à 40 m, quel que soit leur type (chemin, route non goudronnée, et route à une chaussée). La distance moyenne aux routes à une chaussée est de 400 m sur le site d'étude alors qu'elle est de 200 m pour les chemins et les routes non goudronnées avec peu de trafic. 65 % des localisations sont incluses dans une zone arborée correspondant soit à des bois soit à de petits bosquets. La distance minimale moyenne entre les localisations du renard et les zones arborées est de 10 m, soit quatre fois plus courte que la distance aux voies de communication. L'espace concerné contient peu de routes et le renard ne montre pas de parcours privilégiés le long de ces routes. Par contre, l'individu semble parcourir de manière préférentielle ou se tenir à proximité des zones de végétation arborée.

Figure 5 : Distances minimales aux voies de communication, aux bâtiments et aux zones arborées d'un renard pendant 24 h en février 2006 (fréquence des relevés de 15 min).



27 L'exemple du renard 2 parcourant un espace peu urbanisé se prête bien à l'analyse des distances minimales. Pour les trois autres renards, les nombreuses constructions et voies présentes dans les espaces parcourus nécessitent une analyse plus précise. Il est possible d'effectuer une segmentation des trajectoires individuelles d'après les vitesses estimées et la distance entre les points (Saccapietra *et al.*, 2008). Selon des seuils définis, des lieux d'arrêts et des lieux de déplacements rapides sont déterminés et sont mis en lien avec l'espace. Certains résultats peuvent être généralisés pour tous les individus suivis. Comme mentionné précédemment, *les déplacements des renards sont moindres pendant la période diurne, et situés principalement dans des zones arborées (bois, jardins). Ils sont dédiés à la recherche de ressources pendant la nuit en dehors des zones arborées contenant leurs gîtes.* Les renards passent à proximité de plusieurs constructions bâties et sont amenés à traverser ou à longer des voies de communication. Ils peuvent aussi exploiter les prés et les champs cultivés si le site en contient.

28 Concernant les cervidés en milieu forestier, plus homogène que le milieu périurbain, la moyenne des distances minimales entre les points GPS et les éléments du paysage nous paraît être un meilleur indicateur pour comparer les deux espèces. Nous calculons cette moyenne entre les points GPS et les voies de communication. *Quel que soit le type de voie (route forestière ou chemin), les chevreuils et plus encore les cerfs semblent s'en tenir à proximité,* respectivement en moyenne à 44 m et à 28 m. 61 % des points GPS des chevreuils sont situés à moins de 50 m des voies, et 87 % des points pour les cerfs. On peut supposer une préférence pour le voisinage des routes notamment pour les cerfs qui peuvent y trouver des herbacées composant leur régime alimentaire. Les voies en milieu forestier correspondent à des ouvertures et sont positionnées sur des zones planes, c'est-à-dire plus facile d'accès que les zones pentues, tout en ne présentant pas l'inconvénient de dérangements importants (pas de circulation automobile, faible fréquentation par les piétons).

3.3. Identification des préférences spatiales

3.3.1. Comparaison entre voisinage proche et espace lointain des animaux

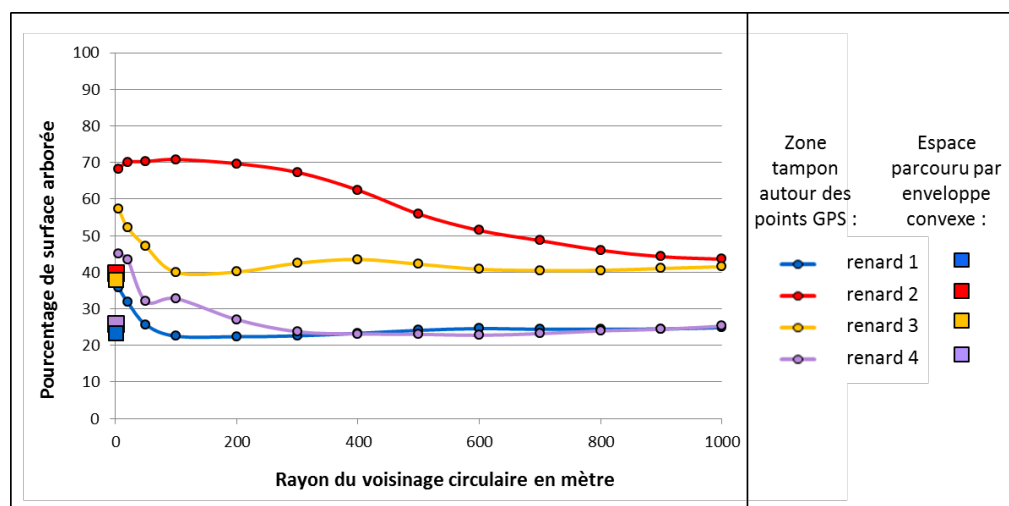
29 Afin d'extraire plus précisément des préférences spatiales, nous proposons d'analyser la composition du paysage à l'intérieur d'un cercle centré sur chaque localisation. En faisant varier le rayon du cercle, les zones tampon obtenues permettent de prendre en compte un espace plus ou moins large et d'en comparer la composition. Les éléments du paysage que sont les routes, les bâtiments, les zones de végétation, l'hydrographie sont qualifiés par leur présence, leur nombre et leur nature le long d'un gradient de distance. Le relief, décrit par l'altitude et la pente, est analysé autour des localisations en retenant la valeur du MNT correspondant aux coordonnées planaires des localisations. Les valeurs dans la zone tampon sont conservées et moyennées par localisation. Les rayons varient de 0 à 1000 mètres autour des localisations. Étant donné la précision des relevés GPS, les changements de composition de l'espace entre 0 et 20 m sont négligés, au profit d'une valeur moyenne. La composition de l'espace est ensuite analysée à 50, 75 et 100 m puis tous les 100 m jusqu'à 1000 m. Ce gradient permet de comparer plus finement l'évolution de la composition des voisinages des animaux. Nous comparons également la composition du site d'étude avec celle dans le voisinage des

localisations. Les préférences identifiées viendront enrichir les connaissances intégrées dans le modèle de simulation des déplacements en termes de zones d'intérêt.

3.3.2. Les renards en milieu périurbain

30 Nous représentons en figure 6 la proportion des zones arborées autour des points GPS des renards en fonction de la valeur du rayon de voisinage. Cette proportion correspond à la moyenne des pourcentages observés autour des différentes localisations d'animaux. Elle a tendance à diminuer jusqu'à 100 m puis à se stabiliser. Ceci peut signifier que pour des rayons inférieurs à 100 m, les individus sont préférentiellement situés dans des lieux où la végétation arborée est importante. La forme des courbes témoigne du contexte différent des espaces parcourus par les individus : le renard 2 évolue dans le milieu le plus boisé alors que les trois autres renards se déplacent dans un tissu urbain plus dense.

Figure 6 : Proportion moyenne de végétation arborée selon la valeur du rayon de la zone tampon autour des points GPS des 4 renards suivis à Nancy. Les pourcentages dans les espaces parcourus sont représentés à l'abscisse nulle.

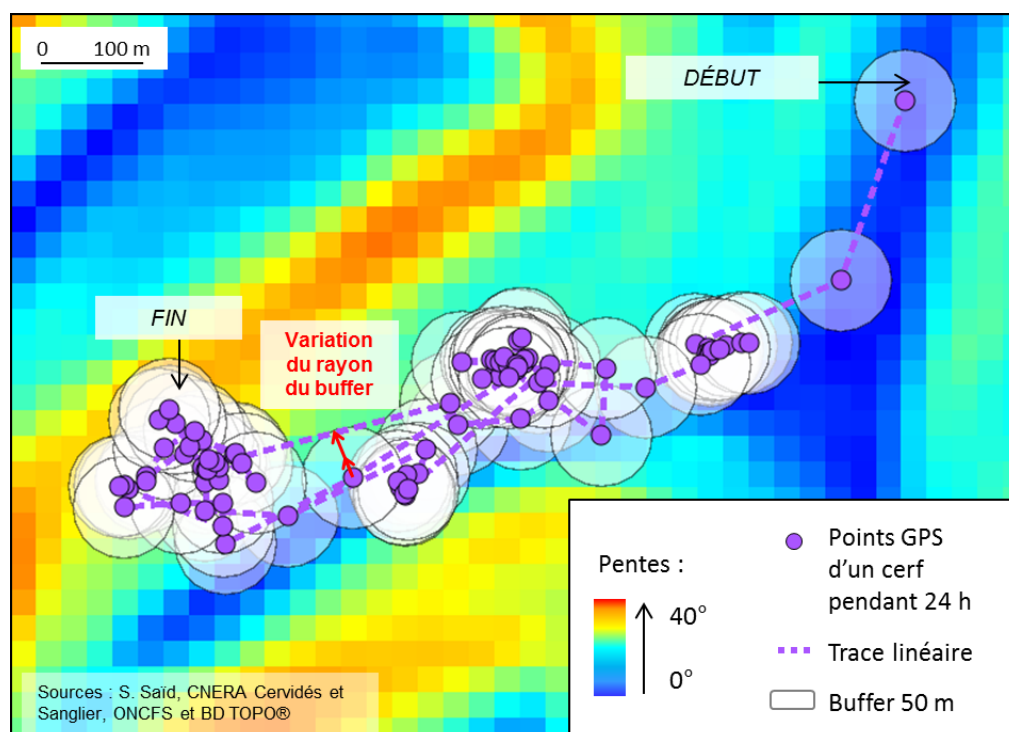


31 Compte tenu des distances séparant les points successifs des quatre renards (moyenne égale à 180 m, 1 m minimum et 1700 m maximum), les buffers se superposent de plus en plus avec l'augmentation du rayon et l'on se rapproche d'une description des espaces parcourus incluant l'ensemble des localisations (cf. partie 3.2.1). La surface arborée est relativement moindre dans les espaces parcourus par les renards qu'autour des localisations élémentaires des individus. Toutefois, elle est moindre dans le site d'étude en comparaison avec les espaces parcourus et le voisinage proche des localisations. *Nous concluons donc à une préférence probable vis-à-vis des zones arborées à une échelle locale, c'est-à-dire au niveau des lieux où les animaux se situent par rapport à leur environnement perçu.* En milieu périurbain, ces zones peuvent représenter un habitat de substitution (Harris et Rayner, 1986) et des lieux de cachette lors des déplacements. De plus, il semble que les renards se tiennent à distance des constructions lors de leurs déplacements hors de leurs gîtes de repos diurnes. *La proximité au bâti reste quand même importante*, en moyenne 40 m lors des déplacements en période nocturne en milieu périurbain dense (renards 1, 3 et 4). Par ailleurs, nous avons estimé les traversées des voies de transport (ferrées, routières et piétonnes) à partir de la trace linéaire interpolée de déplacement. Le nombre de traversées minimales par jour est en moyenne de 15 par individu pour les chemins et de 20 pour les routes à une chaussée, sachant que les chemins représentent 15 % des voies de transport de l'ensemble du site d'étude et les routes à une chaussée 75 %. Seules 4 traversées d'une autoroute, correspondant à deux allers-retours, et 10 traversées de routes à deux chaussées sont observées pour deux des quatre renards. Concernant les voies ferrées, deux des renards vivent à proximité. Ils les longent mais les traversent peu. L'axe des trains représente une barrière alors que les bordures herbeuses de la voie constituent, en zone urbaine, des lieux privilégiés de passage des renards. *La voie ferrée peut être favorable lorsqu'elle est longée par le renard dans sa partie non dangereuse, et peut constituer une barrière lorsqu'il s'agit de les traverser.*

3.3.3. Les cervidés en milieu forestier

32 Concernant les cervidés, le site d'étude est recouvert quasiment entièrement par la forêt et le type d'habitat sélectionné est le milieu forestier. L'étude des préférences porte notamment sur le type de peuplement forestier. Il est possible de distinguer certaines tendances générales quant à l'exploitation des essences forestières par les cervidés à partir de la base Carte Forestière. Lorsque l'on compare la composition en peuplements autour des points GPS des chevreuils et des cerfs avec la composition du site d'étude, nous remarquons une fréquentation préférentielle des forêts de feuillus et des secteurs de végétation ouverte (jeunes peuplements ou coupe rase). *Les chênaies et les forêts mélangées de feuillus sont particulièrement sélectionnées, alors que les hêtraies pures sont délaissées*, ce qui pourrait s'expliquer par leur strate arbustive et herbacée clairsemée offrant moins de ressources que les autres forêts de feuillus. Le hêtre est moins nutritif pour les chevreuils et les cerfs (Krojerova-Prokesova *et al.*, 2010). Les jeunes peuplements et les coupes rases offrent des ressources intéressantes pour les cervidés comme des jeunes pousses pour les chevreuils et des herbacées en particulier pour les cerfs. La pente a également une influence sur les choix de direction à proximité des formes de terrain escarpées. La distribution des valeurs de pente est à peu près régulière entre 0 et 40° sur le site d'étude. Autour des localisations, la moyenne des pentes est plus faible : environ 10° pour les chevreuils et 15° pour les cerfs. *Les déplacements semblent pour les deux espèces s'effectuer sur des zones peu pentues*, comme dans l'exemple de la figure 7 d'un cerf se déplaçant principalement dans un talweg.

Figure 7 : Analyse de l'influence de la pente sur les déplacements d'un cerf pendant 24 h : il privilégie les zones planes même s'il est capable de se déplacer sur de fortes pentes.



3.4. Synthèse

33 Les différentes analyses des relations entre espace et déplacement permettent de formuler des connaissances sur les comportements des animaux et sur leur espace fonctionnel. Les résultats sont également intéressants car les préférences ont été détectées à partir des données géographiques à grande échelle disponibles sur l'ensemble du territoire. Les connaissances concernent essentiellement les préférences spatiales c'est-à-dire des motivations aux déplacements. Les lieux favorables aux déplacements et les obstacles sont plus difficiles à identifier pour des raisons de fréquence et de précision des localisations et des données géographiques. Nous résumons en tableau 2 les résultats de l'ensemble de

nos analyses (non présentées exhaustivement précédemment) et les connaissances exploitées ensuite dans le modèle de simulation de déplacements en fonction de l'espace.

Tableau 2 : Les connaissances, exploitées dans le modèle agent, concernant l'influence de l'espace sur les déplacements des trois espèces animales étudiées. La description de l'espace correspond aux données de la BD TOPO®.

| Espèce | Milieu du site d'étude | Zone d'intérêt | Lieu favorable au déplacement | Zone évitée | Obstacle au déplacement |
|------------------|------------------------|---|---|--|---|
| <i>renard</i> | périurbain | - Végétation arborée - Zone bâtie - Zone d'activité | - Végétation arborée - Voie ferrée (bordure) | - Proximité des autoroutes | - Autoroute ou route à 1 ou 2 chaussées - Voie ferrée (axe des trains) |
| <i>chevreuil</i> | forestier | - Peuplement de feuillus - Pente faible {moins de 5°} - Altitude surplombante | - Peuplement de feuillus ou mélangés - Chemin - Pente moyenne {jusqu'à 20°} | - Peuplement de conifères - Pente forte {plus de 20°} | - Route avec trafic - Pente forte |
| <i>cerf</i> | forestier | - Peuplement de feuillus - Pente faible {moins de 10°} | - Peuplement de feuillus - Route forestière - Pente moyenne {jusqu'à 20°} | - Peuplement de conifères - Pente forte {plus de 20°} | - Route avec trafic - Pente forte |

4. Le modèle agent de simulation de trajectoires

34 La construction des trajectoires nécessite l'implémentation de connaissances sur le comportement de déplacement, formulées d'après les résultats d'analyses de données, la littérature et les savoirs des experts. Le modèle de caractérisation de l'espace et des déplacements de la faune présentée en figure 2 permet de formaliser les résultats d'analyses. Ce modèle reste assez générique afin de pouvoir l'adapter en fonction des espèces animales. Sa mise en place est toutefois liée à nos cas d'étude. Nous utilisons par ailleurs les mêmes sources de données pour la description de l'espace que dans les analyses précédentes. Nous présentons les comportements de déplacement des animaux que nous modélisons dans notre modèle de simulation et la stratégie de simulation. L'implémentation du module permettant de lancer des simulations s'est effectuée dans la plateforme SIG GeOxygene qui s'appuie sur des bibliothèques en Java et une interface de visualisation 3D (Brasebin, 2009).

4.1. Définition des agents

35 La définition du modèle pour simuler des trajectoires s'appuie sur la modélisation agent. Celle-ci offre la possibilité de créer des entités pourvues de comportements propres en interaction avec l'environnement spatial dans le cas d'agents localisés (Treuil, 2008 ; MIRO, 2006). Elle facilite la prise en compte des contraintes intrinsèques aux espèces et des caractéristiques de l'espace (Anwar *et al.*, 2007 ; Mechoud *et al.*, 2000). Dans notre modèle, un agent est un individu appartenant à une espèce animale. Il hérite du comportement général de son espèce : vitesse moyenne de déplacement, préférence spatiale, réponse face à des obstacles. L'environnement-agent que les agents perçoivent et dans lequel ils se déplacent est constitué des données géographiques représentant les éléments naturels et construits du paysage. Les agents possèdent les caractéristiques ci-dessous, correspondant notamment à celles listées par Ferber (1995) :

- ils sont situés, c'est-à-dire qu'ils connaissent leur localisation par rapport aux éléments ;
- ils sont autonomes car ils ont leurs propres activités. Ils décident quelle direction prendre en fonction de leur activité du moment et de leur voisinage spatial ;
- ils ont une mémoire des lieux déjà visités ;
- ils sont flexibles car ils peuvent adapter leur comportement en fonction des éléments paysagers rencontrés, par exemple ils peuvent modifier leur direction s'il y a trop d'obstacles rencontrés.

36 Les agents possèdent alors des facultés cognitives. Ils ne réagissent pas uniquement par réflexe. Ils prennent des décisions de choix de direction en fonction de la présence des éléments du paysage qui constituent l'espace fonctionnel évoqué en partie 2.1. L'agent a une perception de son environnement qui est simplifiée par rapport à celle d'un animal. Nous ne détaillons pas les différents types de perception possible qui peuvent être visuelle, sonore ou encore olfactive. Les interactions se réalisent entre les agents et l'espace car nous nous concentrons sur cet aspect des déplacements. Par contre, les agents ne communiquent pas entre eux dans notre modèle. Les comportements intégrés des agents sont les préférences de situation par rapport aux éléments du paysage, les lieux favorisant les déplacements et les obstacles. Nous nous intéressons aux déplacements quotidiens, ce qui exclut les déplacements plus exceptionnels sur de très longues distances pouvant être associés à des comportements inhabituels (par exemple des migrations).

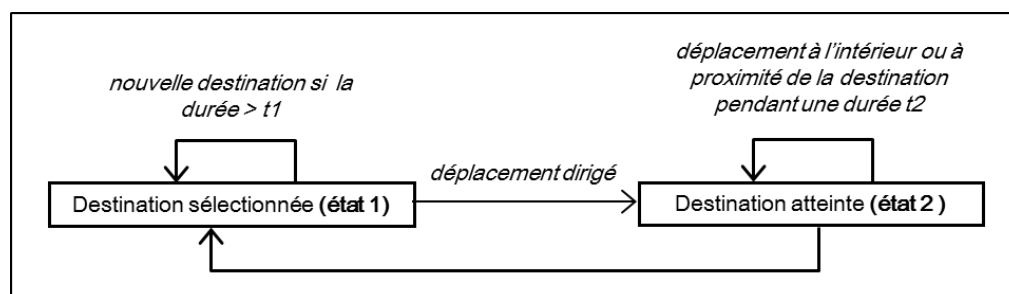
4.2. Le processus général de construction de trajectoires par les agents

37 Nous déterminons pour un agent animal le comportement de déplacement qui lui permet ensuite de construire des trajectoires. Ce comportement peut être décomposé en étapes successives.

- 1^{ère} étape : l'agent connaît sa localisation et il perçoit son environnement spatial autour de cette localisation.
- 2^{ème} étape : l'agent choisit une destination qui est un élément paysager d'intérêt pour l'espèce en fonction de son activité du moment (repos, alimentation et recherche de ressources ; voir partie 4.3.1).
- 3^{ème} étape : l'agent se déplace de proche en proche vers cette destination en évitant si possible les obstacles.
- 4^{ème} étape : l'agent exploite la destination atteinte. Il la parcourt s'il s'agit d'un élément d'intérêt étendu comme une zone arborée. Il reste à proximité si la destination est un élément plus restreint et hermétique comme un bâtiment.

38 Lorsque la destination est atteinte et exploitée, l'agent revient à la 1^{ère} étape où il perçoit son environnement afin de choisir une autre destination. Ce comportement général correspond pour les agents à deux états. Le premier état correspond au déplacement vers la destination sélectionnée. Si le temps d'atteinte de la destination est trop long, alors une nouvelle destination est choisie. Le second état correspond au moment où la destination est atteinte et il consiste en l'exploration de la destination (voir la figure 8). Les durées des états peuvent être paramétrées en fonction des observations sur les rythmes de déplacement : la durée des phases de pause et celle des phases de déplacement plus rapide.

Figure 8 : Les deux états des agents lors du processus de construction de trajectoires.

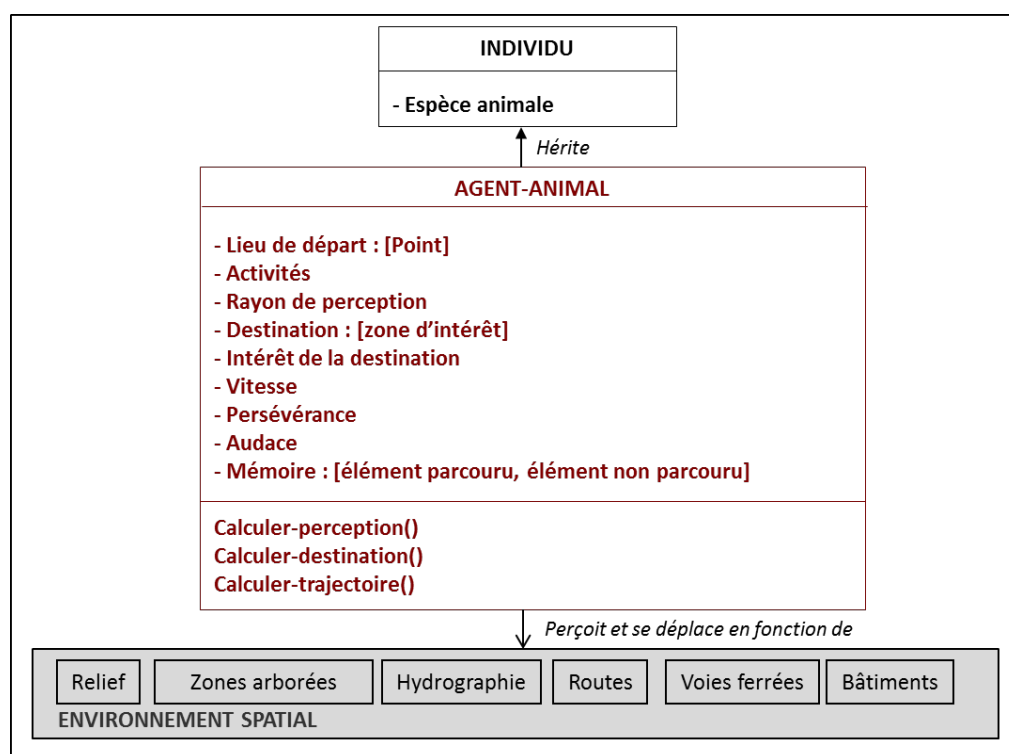


4.3. Les propriétés et les fonctions des agents

39 Afin de pouvoir implémenter le modèle et lancer la construction de trajectoires, il est nécessaire de traduire les capacités et les comportements des agents grâce à des propriétés et des fonctions paramétrables. De plus, l'environnement doit être caractérisé afin de pouvoir être perçu par les agents. Notre objectif reste de pouvoir visualiser des trajets cohérents réalisés par un agent animal en fonction de la configuration des éléments du paysage, ceci afin

d'estimer des modifications de l'espace. Nous avons favorisé les interactions entre l'agent et l'environnement spatial, plutôt que la prise en compte stricte des rythmes de déplacement. Nous détaillons dans les sous-parties, les attributs et les fonctions de la classe agent et l'environnement, listés en figure 9.

Figure 9 : Classe « agent », héritant de la classe « individu » et interagissant avec l'environnement spatial.



4.3.1. Les propriétés

40 L'agent animal hérite des comportements d'un individu qui sont définis de manière générale pour une espèce animale. Les attributs de l'agent lui permettent de construire des trajectoires à partir de ses propres caractéristiques et des contraintes spatiales. Nous indiquons les connaissances mobilisées (résultats d'analyse, littérature et interprétation des écologues) correspondant à nos cas d'étude et leur traduction dans le modèle.

- Le lieu de départ. Il s'agit d'une localisation qui constitue le point initial de la trajectoire construite.

41 Connaissances : les lieux de départ se situent dans un environnement spatial correspondant au milieu de vie de l'espèce animale de l'agent : milieux forestiers (et agricoles) pour les cervidés, milieux divers pour le renard.

- Les activités. Elles sont de trois types : le repos, l'alimentation et la recherche de ressources (nourriture, lieu de refuge). Les deux premières activités sont associées à l'exploitation des destinations, et la dernière à la sélection de destination et au déplacement pour l'atteindre.

42 Connaissances : pour le renard, les heures diurnes sont dédiées au repos et les heures nocturnes au déplacement et à l'alimentation. L'alternance des phases de repos et d'alimentation ont lieu toutes les heures pour le chevreuil et toutes les six heures pour le cerf. Cette estimation est très simplifiée, mais sa prise en compte permet d'augmenter le réalisme des rythmes de déplacement.

- Le rayon de perception. Nous avons traduit par une distance, la perception globale de l'environnement par l'agent.

43 Connaissances : sans détailler les types de perception, l'animal perçoit mieux son voisinage proche qui l'influence probablement davantage que les éléments du paysage éloignés.

- La destination. Il s'agit de la destination sélectionnée successivement aux autres déjà sélectionnées et que l'agent a réussi à atteindre ou non.
- 44 Connaissances : les destinations correspondent à des zones d'intérêt (cf. tableau 2). Pour le renard en milieu périurbain, ce sont les zones arborées et proches du bâti si l'activité est la recherche de ressources, et uniquement les zones arborées si l'activité est le repos. Pour les cervidés, ce ne sont que les zones arborées quelle que soit l'activité.
- L'intérêt de la destination. Cet intérêt augmente en fonction de l'importance de la destination (superficie) et diminue avec la distance à l'agent (inférieure au rayon de perception néanmoins). Sa valeur n'a pas de borne supérieure. Les critères (distance, superficie) sont attribués à des valeurs comprises entre 1 et 5 qui sont additionnés.
- 45 Connaissances : l'évaluation de l'intérêt provient d'hypothèses. Pour les cervidés, nous avons accru l'intérêt des zones arborées s'il s'agit de peuplements de feuillus.
- La vitesse. Exprimée en km/h, elle détermine la distance potentiellement parcourue par rapport à la durée paramétrée entre deux localisations successives construites. Cette vitesse diminue si l'agent rencontre un obstacle.
- 46 Connaissances : d'après l'analyse des relevés GPS, la vitesse attribuée par défaut pour le renard est 2,2 km/h, pour le chevreuil 0,35 km/h, pour le cerf 0,45 km/h.
- La persévérance. C'est une valeur comprise entre 0 et 2 qui diminue ou augmente la durée pendant laquelle l'agent va chercher à atteindre la destination qu'il a sélectionnée (état 1).
- 47 Connaissances : cet attribut concerne un agent en particulier et se base sur des hypothèses de variation du comportement individuel.
- L'audace. De même que pour la persévérance, sa valeur est comprise entre 0 et 2, et elle influence les traversées des obstacles.
- 48 Connaissances : c'est également un aspect de la personnalité des individus s'appuyant sur des hypothèses.
- La mémoire. Un agent garde en mémoire les destinations qu'il a déjà atteintes et exploitées. Il est possible de paramétrer le modèle en forçant l'agent à sélectionner des destinations non atteintes précédemment. L'attribut mémoire indique si une destination peut être sélectionnée plusieurs fois ou non.
- 49 Connaissances : cet attribut correspond au comportement par espèce. Le renard a tendance à parcourir plusieurs zones d'intérêt en une nuit, alors que les cervidés vont revenir et rester plus longtemps sur des zones d'intérêt lors d'une même journée.
- 50 Les valeurs des attributs sont définies par défaut, mais il est possible de les modifier afin de mieux adapter le modèle au comportement des agents par espèces (voir les tests d'implémentation en 5.1). En perspective, nous pourrions améliorer notre modélisation. Par exemple, nous pourrions considérer qu'un individu connaît mieux son espace de vie avec l'âge. Nous pourrions intégrer cet aspect dans la mémoire des zones d'intérêt en dehors du rayon de perception.

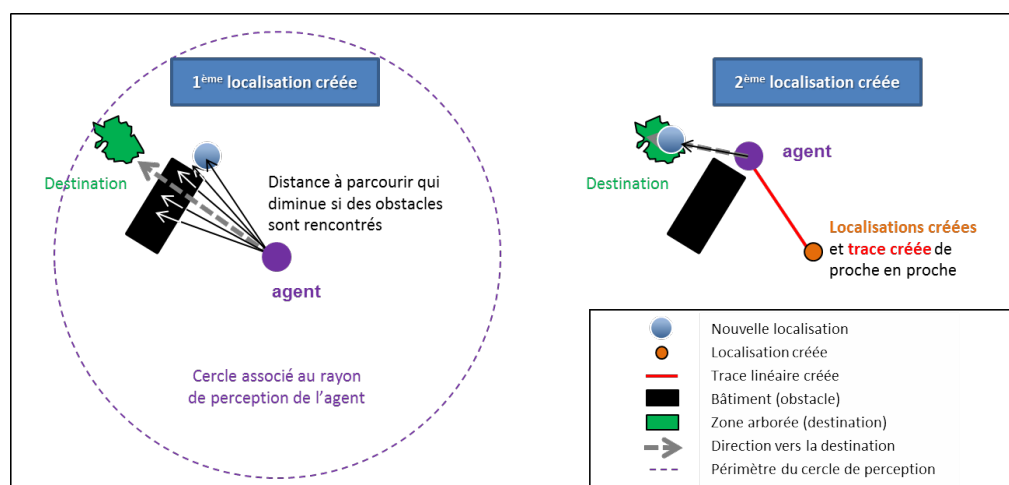
4.3.2. Les fonctions

- 51 Pour construire des trajectoires, l'agent est associé à des méthodes de perception, de sélection d'une destination et de déplacement (figure 9). Ces fonctions s'appuient sur une caractérisation de l'environnement spatial en éléments favorables pour les déplacements, et constituant soit des zones attractives, soit des couloirs ou des obstacles qui ralentissent ou arrêtent les déplacements. Une part d'aléatoire intervient dans la construction des trajectoires par un même agent avec les mêmes paramètres de simulation.
- 52 Tout d'abord la fonction de perception liste tous les éléments de l'environnement spatial à l'intérieur du cercle correspondant au rayon de perception.
- 53 La fonction de sélection d'une destination renvoie dans un premier temps une liste de destinations potentielles qui répondent aux critères de perception et d'intérêt. Le nombre de destinations potentielles est également réduit après le calcul d'une fonction de coût au

déplacement général entre la localisation actuelle de l'agent et chaque destination potentielle. La fonction de coût prend en compte le nombre d'obstacles comme les routes ou les voies ferrées ainsi que les zones favorables au déplacement comme les zones arborées. Une seule zone de destination est finalement choisie aléatoirement parmi cette liste. Pour les trois espèces étudiées et pour la description de l'environnement spatial, une destination choisie est un bâtiment ou une autre est une zone arborée.

54 La fonction de déplacement construit la trajectoire point par point. L'agent appréhende de manière précise la géométrie des données géographiques représentant les éléments du paysage. Nous nous sommes inspirées de l'algorithme A* (Kallmann, 2005). À partir de sa localisation actuelle, l'agent calcule sa prochaine localisation en scannant son voisinage spatial par projetés de rayon. La distance scannée dépend du pas de temps entre deux localisations, par défaut 1 minute, et de la vitesse. La première direction scannée est celle orientée vers la destination. Si un obstacle est détecté, les directions considérées sont déviées peu à peu par un petit angle (par défaut 1°) jusqu'à ce que l'obstacle ne soit plus croisé ou alors que l'agent décide de le traverser, voir la figure 10.

Figure 10 : Visualisation du principe de l'algorithme de construction de trajectoire : à partir de la localisation actuelle, l'agent scanne l'espace autour de lui pour contourner les obstacles, ou si possible, les traverser. Exemple pour un bâtiment hermétique et correspondant à une probabilité de traversée nulle.



55 Les obstacles sont soit hermétiques (bâtiments) et ne peuvent pas être traversés, soit traversables (voies routières et ferrées, cours d'eau). Une probabilité de traversée représentant sa perméabilité est associée par type d'obstacle et selon les espèces animales. De manière générale, l'hypothèse est que les animaux traversent plus volontiers une route étroite et peu empruntée qu'une route large avec un trafic important. Une part d'aléatoire est présente à ce niveau du processus : l'agent génère automatiquement un nombre entre 0 et 1 et si ce chiffre est supérieur à la probabilité de traversée, alors il dévie sa trajectoire. La vitesse de déplacement diminue à partir de la valeur de vitesse attribuée par espèce animale si un obstacle est rencontré et que la trajectoire doit être déviée. Elle augmente à nouveau progressivement s'il n'y a plus d'obstacle. Concernant la pente, cette composante est prise en compte par un seuil. Si ce seuil est dépassé alors l'agent dévie sa trajectoire si possible vers un chemin de pente moins importante, ce qui correspond au choix d'un individu optimisant ses efforts.

56 Deux types de déplacement sont prévus par le modèle : les déplacements libres avec la détermination de destinations temporaires successives et les déplacements vers un objectif localisé fixe. Un objectif fixe permet de simuler des déplacements en dehors de l'espace qui serait parcouru quotidiennement tels des déplacements exploratoires. Nous traduisons cette contrainte supplémentaire en réduisant le voisinage considéré. La fonction de perception réduit le cercle à un arc de cercle dirigé vers l'objectif fixé. La simulation s'arrête lorsque la durée totale paramétrée est écoulée, ou, dans le déplacement vers objectif fixé, si cet objectif est à proximité (par défaut à moins de 5 m).

5. Expérimentation et évaluation des conséquences des modifications de l'espace

57 Nous analysons à présent les résultats obtenus à partir de la définition de notre modèle de simulation agent. L'implémentation dans GeOxygene a concerné les classes du modèle théorique des relations entre l'espace et les déplacements d'animaux (figure 2) ainsi que les classes uniquement consacrées aux agents (figure 9). Le modèle est dans un premier temps testé en adoptant une approche critique des trajectoires simulées. Cela nous permet :

- d'adapter la valeur des paramètres associés aux agents et au processus de simulation ;
- de qualifier la cohérence des déplacements simulés.

58 Puis, compte-tenu des résultats, nous proposons de modifier l'environnement spatial et d'étudier les conséquences sur les trajectoires simulées. Par souci de clarté et de synthèse, nous présentons dans cette partie les résultats de simulation et les comparaisons avec les observations principalement pour le cas des renards dans le site périurbain. Nous illustrons également quelques résultats pour les chevreuils en 5.2 en parallèle de ceux pour les renards.

5.1. Les résultats de simulation

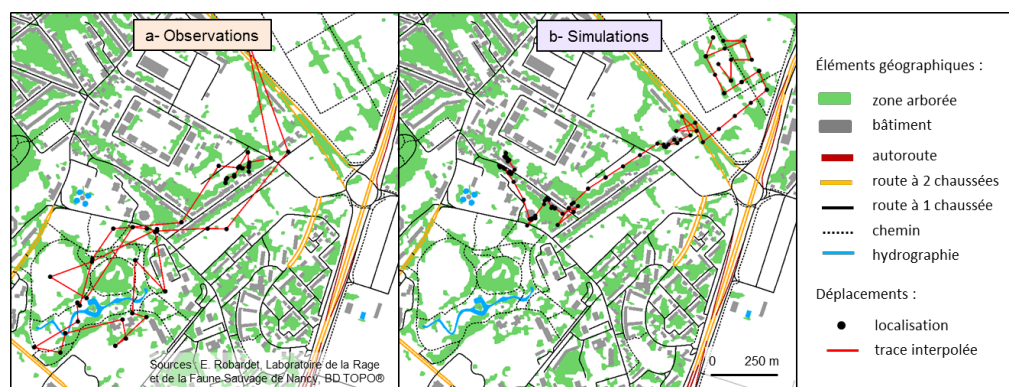
59 L'objectif de la simulation est d'obtenir des trajectoires vraisemblables et cohérentes avec les déplacements observés en termes de relations avec les éléments du paysage, même si la description de l'espace n'est pas exhaustive et si les connaissances modélisées sur les déplacements sont incomplètes. La démarche de validation des résultats obtenus à partir de la simulation agent demeure la même pour les différents cas d'étude. Pour un même agent et un même paramétrage (lieu de départ, pas de temps), plusieurs trajectoires alternatives sont construites. Nous nous sommes limitées à 30 alternatives, ce qui permet de prendre en compte les effets de la partie aléatoire dans la construction de trajectoires. Les trajectoires simulées sont comparées aux observations concernant la même espèce et sur le même site géographique à l'aide d'indicateurs détaillés par la suite. Nous avons effectué des tests pour nos deux cas d'étude et les trois espèces animales. La durée de simulation correspond à un déplacement pendant 24 h. Le pas de temps entre deux localisations créées est 1 minute. Le rayon de perception est fixé à 50 m pour toutes les espèces. L'environnement agent est décrit par les données de la BD TOPO®.

60 La comparaison entre les trajectoires simulées et les trajectoires observées est réalisée qualitativement et quantitativement. Les chemins empruntés et les éléments géographiques parcourus sont comparés visuellement afin de déterminer si le modèle aboutit à des résultats proches de la réalité ou non. Nous calculons des indicateurs sur la forme de la trajectoire et sur les relations entre trajectoires et données géographiques. Nous étudions ainsi :

- la distance parcourue totale ;
- la distribution des distances parcourues entre chaque point et la distribution des angles relatifs ;
- la moyenne des distances entre chaque point de la trajectoire et l'élément du paysage le plus proche, ceci par thème géographique : bâti, route, zone arborée et d'autres thèmes selon le site ;
- le nombre de voies de communication traversées et la répartition des points par rapport aux zones arborées ;
- la répartition des points par rapport aux valeurs de pente.

61 La figure 11.a présente les points d'un renard enregistrés toutes les quinze minutes pendant six heures. La figure 11.b montre un sous-échantillonnage à quinze minutes des points simulés toutes les minutes par le modèle pendant la même durée que les observations. Les lieux d'intérêt représentant des destinations sont les zones arborées et les bâtiments, comme nous l'avons constaté lors des analyses. Les obstacles sont les bâtiments et les routes respectivement hermétiques et traversables (probabilité de traversée égale à 0,3 pour les routes à une chaussée et à 0,2 pour celles à deux chaussées). Visuellement, les déplacements observés sont davantage erratiques et sinueux que ceux simulés, comme on peut le constater en figure 11.

Figure 11 : Traces interpolées pendant 6 heures pour un renard en milieu périurbain à partir : a) des points enregistrés, b) des points simulés par le modèle.



Les traces issues des simulations correspondent à un comportement automatique des agents qui appréhendent leur environnement uniquement via les composantes spatiales. Leur forme est simplifiée. Cependant, nous constatons que le modèle permet aux agents de respecter l'influence générale des éléments du paysage sur les déplacements des animaux. Pour le renard, la préférence modélisée envers les zones arborées ainsi que l'évitement des routes et des bâtiments sont respectés localement. Ces relations spatiales permettent la construction de trajectoires cohérentes, qui se situent dans des lieux moins densément urbanisés (exemple en figure 11 au nord du site) et qui croisent peu les routes importantes (en figure 11 : une route importante à l'est).

Afin de tenter de quantifier les différences entre observations et simulations, nous calculons les indicateurs numériques sur la moyenne des 30 trajectoires construites par le même agent de l'espèce renard. Leurs valeurs sont indiquées en tableau 3. Concernant le parcours des zones arborées, celles-ci sont moins nombreuses dans les observations, ce qui est dû à la détermination de destinations successives différentes par les agents grâce à leur mémoire des éléments parcourus. Pour le pourcentage de points par rapport aux zones arborées, la préférence semble respectée par le modèle.

Les intersections avec les routes sont moins nombreuses dans les observations, par contre le nombre de routes différentes traversées est plus important. Le nombre élevé d'intersections provient de la construction des trajectoires qui amène les agents à longer les voies et possiblement la trace linéaire à croiser ces voies avant une traversée définitive pour atteindre leur destination. Si l'on regarde la distance moyenne aux routes ainsi qu'aux bâtiments, les valeurs sont dans le même ordre de grandeur entre les observations et les simulations. Pour les bâtiments, la distance est légèrement inférieure dans les simulations car ceux-ci sont définis comme élément d'intérêt (destination) par le modèle.

Enfin, la répartition des points simulés présente peu de différences par rapport aux valeurs de pentes. Le site correspond à un relief plat. La pente a donc une faible influence.

Tableau 3 : Les indicateurs calculés pour les observations d'un renard pendant une journée et pour les 30 traces simulées par un agent de cette espèce.

| Indicateurs | dénombrement | | | % de localisations | | | | distance moyenne (en mètre) | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|--------------|----------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
| | nombre de zones arborées parcourues | nombre d'intersections avec une route | nombre de routes croisées | en dehors des zones arborées | pent. [0;5[| pent. [5;10[| pent. [10;100[| bâtiments | routes à 1 chaussée | routes à 2 chaussées |
| trace GPS enregistrée | 17 | 113 | 83 | 60,1 | 96,37 | 3,63 | 0 | 24,0 | 35,1 | 264,3 |
| moyenne pour les 30 traces simulées | 47,0 | 126,0 | 37,6 | 62,2 | 98,7 | 1,2 | 0,1 | 18,6 | 27,9 | 279,2 |

- 66 Les distances totales parcourues en une journée sont plus grandes dans les simulations : 22 km en moyenne contre 11 km pour les observations. Cela signifie que *le modèle surestime les déplacements* et qu'il ne prend pas bien en compte l'alternance entre le rythme diurne et le rythme nocturne. L'algorithme de simulation modélise davantage les comportements de déplacement que les phases de repos. Dans le modèle, cette alternance est uniquement pris en compte par une restriction des destinations aux zones arborées pendant la nuit (donc sans les bâtiments). La prise en considération des rythmes de déplacement serait à améliorer afin d'augmenter le réalisme des simulations. On peut conclure que *le modèle de simulation a tendance à accentuer la préférence des renards pour les zones arborées*, logiquement avec l'algorithme de construction et les distances parcourues. *Le modèle exagère aussi l'évitement des routes* car peu de routes différentes sont traversées, même si celles-ci sont traversées plusieurs fois dans les déplacements observés.
- 67 Les critiques du modèle de simulation permettent d'identifier quels sont les points faibles à considérer lors des interprétations des tests sur les effets d'aménagements. De manière générale, nous avons favorisé les déplacements sur de longues distances dans le modèle, ce qui peut amener à des parcours de l'espace différents pour le rythme d'activité quotidien. Certains comportements des agents restent aussi à préciser, comme lorsqu'ils longent les obstacles situés à proximité. Les relations avec les éléments du paysage sont toutefois relativement bien respectées.

5.2. Modification de l'espace et conséquences sur les trajectoires simulées

5.2.1. Le protocole d'évaluation

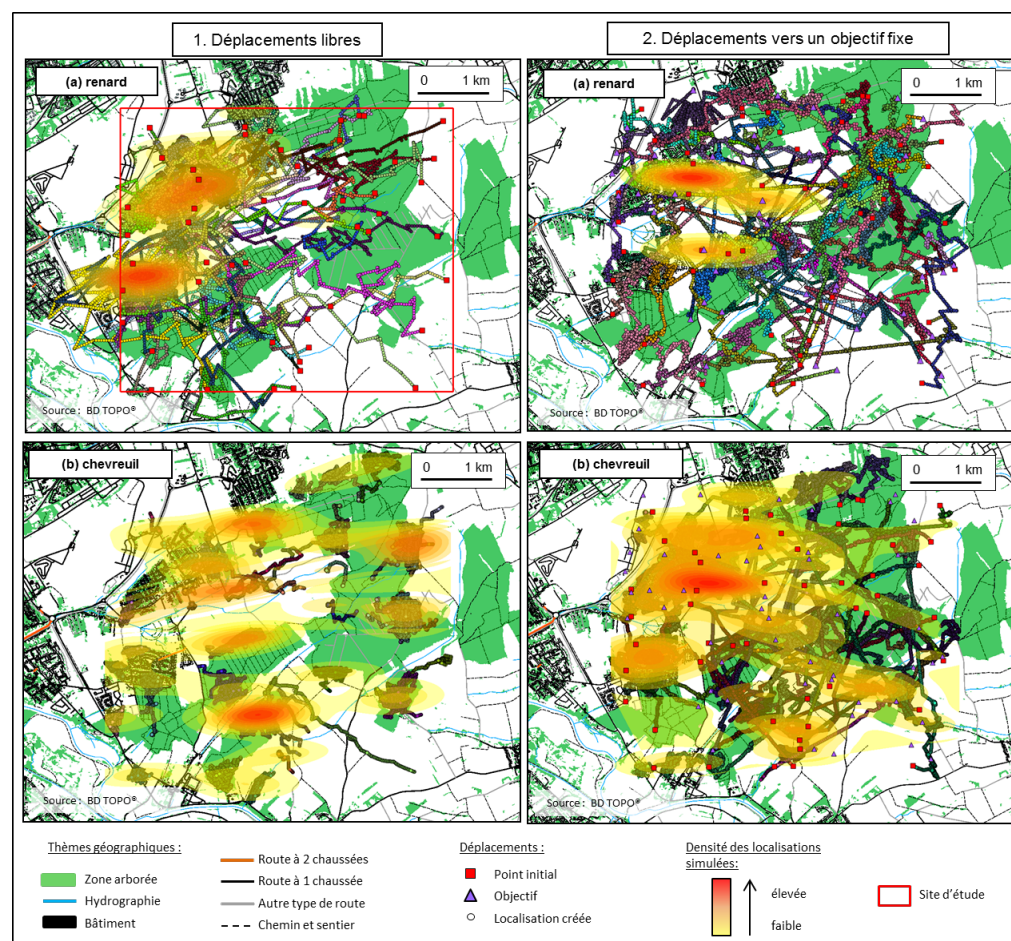
- 68 Pour évaluer les effets des modifications de l'espace sur les déplacements, nous retenons le cas de la création fictive d'une route sur le site de l'agglomération de Nancy. Dans un premier temps, nous avons comparé les observations avec les trajectoires simulées du renard étudié dans un espace non modifié. Nous effectuons à présent des tests sur un même site d'étude pour les trois espèces étudiées – renard, chevreuil et cerf. Le site choisi est en majorité couvert par des bois et des prairies et il contient des zones bâties au nord-ouest (voir figure 13.1). La présence de chevreuils et de cerfs n'est pas avérée sur ce site en particulier mais le milieu reste cohérent avec les préférences des trois espèces. La situation demeure fictive et l'objectif est de regarder si notre modèle donne des résultats intéressants.
- 69 Nous souhaitons tester les conséquences d'une nouvelle route sur des déplacements quotidiens et sur des déplacements plus exceptionnels tels des explorations. Comme mentionné dans la partie 4, il est possible d'entrer un objectif final à atteindre comme paramètre de l'algorithme de déplacement. Nous avons effectué précédemment les expérimentations dans le cadre de déplacements libres sans objectif final. Nous lançons à présent des simulations en fixant un objectif – une destination – afin de représenter les deux types de déplacement. La définition d'un objectif fixe permet d'orienter les agents vers une direction et les pousse à parcourir certaines parties de l'espace. Pour les chevreuils par exemple, les déplacements quotidiens sont réalisés sur une petite surface. La moyenne des domaines vitaux peut varier entre 30 et 60 ha, même si cette valeur reste variable selon le contenu des domaines ou les conditions climatiques (Saïd *et al.*, 2005). Une destination fixe permet de forcer un mouvement sur une longue distance et ainsi la traversée de la nouvelle route dont nous souhaitons évaluer les conséquences.
- 70 Nous commençons par présenter le scénario de référence sur le site d'étude non modifié (5.2.2). Un agent construit des trajectoires à partir de cinquante points initiaux répartis aléatoirement. Les déplacements sont d'abord libres, représentant un rythme quotidien. Puis les déplacements sont dirigés vers cinquante autres points également définis aléatoirement. Nous lançons ensuite les scénarios sur le même site avec une nouvelle route construite (5.2.3). Nous nous concentrons sur la présentation des résultats concernant les renards et les chevreuils.

5.2.2. Le scénario de référence

- 71 Nous comparons les déplacements libres lancés pour un agent correspondant à l'espèce renard puis à l'espèce chevreuil en figure 12.1. Le paramétrage par défaut, également utilisé en

5.1, est conservé. Les différences entre les deux agents sont : la vitesse, le rythme d'activité entre phases de pause et phases de recherche de ressources, la possibilité pour le chevreuil de sélectionner successivement une même destination, les éléments d'intérêt qui sont les bâtiments et les zones arborées pour le renard et uniquement les zones arborées pour le chevreuil. Afin de visualiser plus facilement les résultats, nous avons utilisé l'interpolation par noyau des points simulés qui rend compte de leur densité, et donc des lieux les plus parcourus. Pour le renard, on remarque une concentration des déplacements simulés autour des zones bâties au nord-ouest, conséquence directe de la composition du site d'étude et de l'algorithme de simulation. Le renard s'attarde peu dans les grandes zones boisées. Le chevreuil effectue des déplacements beaucoup plus limités et reste à proximité de son point initial, notamment dans les bois. Si le point initial est situé près de bâtiments, l'agent reste quand même à proximité mais privilégie les petites zones arborées.

Figure 12 : Simulations (1) de déplacements libres et (2) de déplacements vers objectif fixe, à partir de 50 points initiaux identiques pour un renard et un chevreuil. Chaque trace simulée est représentée par une couleur différente.



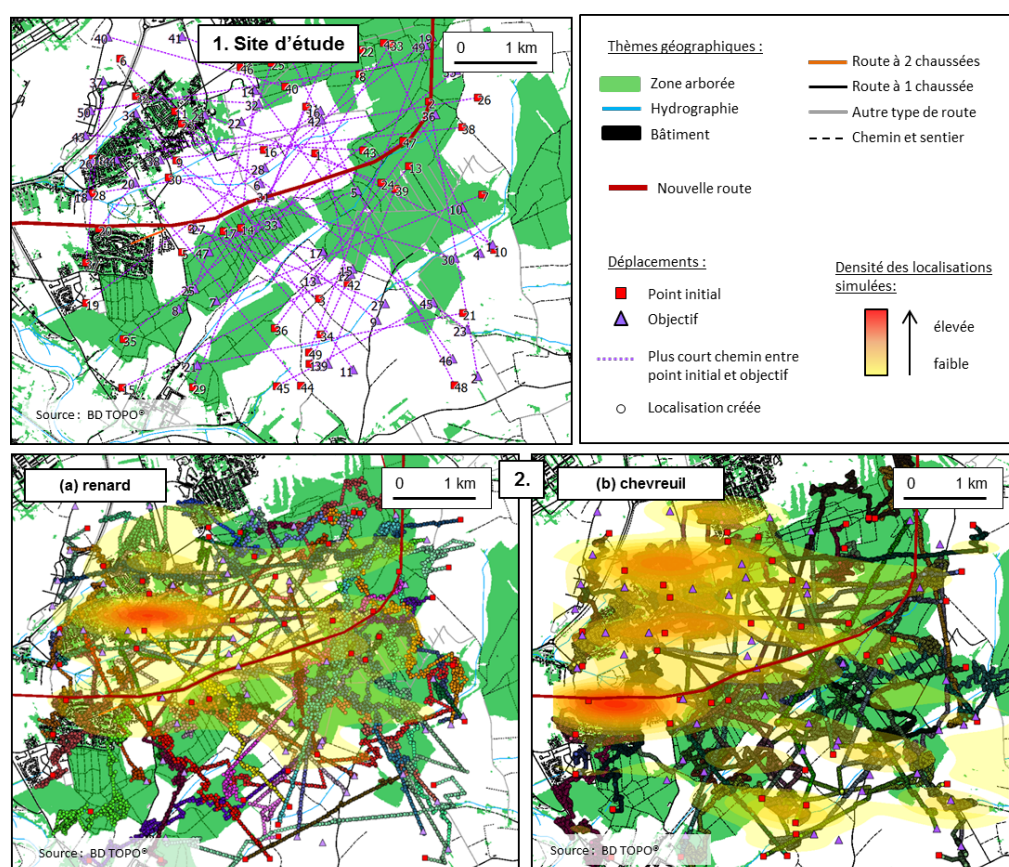
La figure 12.2 représente les déplacements vers des objectifs fixés pour les deux espèces. Dans cas du renard, les déplacements sont à nouveau concentrés dans les zones urbanisées, même s'ils sont davantage répartis sur l'ensemble du site par rapport aux déplacements libres. Le changement est plus radical pour le chevreuil qui est amené à se déplacer sur des espaces plus vastes lorsque l'objectif est fixé. La zone urbanisée est également fortement parcourue, ce qui est dû à la présence d'une végétation fragmentée et donc d'une grande densité de zones d'intérêt. Ces résultats semblent peu réalistes sur le parcours de zones bâties. Ils permettent néanmoins de visualiser la différence entre des déplacements quotidiens sur de petits espaces moins susceptibles d'être affectés par la construction d'infrastructures de transport, et des déplacements sur de longues distances rencontrant plus probablement des obstacles.

5.2.3. Les effets d'aménagements sur les trajectoires simulées

73

L'ajout d'une route traversant le site d'étude pose la question des conséquences pour les différentes espèces d'une barrière aux déplacements. La nouvelle route est cartographiée en figure 13.1. Nous avons attribué à la route une probabilité de traversée très faible, de 1 %, ce qui doit provoquer une déviation des déplacements mais ne bloque pas leur traversée. Nous nous plaçons dans le cadre des objectifs fixes. La répartition des points de départ et des objectifs font que l'agent doit traverser la nouvelle route dans la moitié des cas (= 25 sur 50). Pour atteindre son objectif à partir du point initial. Les trajectoires sont construites par deux agents de l'espèce renard puis chevreuil à partir de la même matrice origine-destination que précédemment. Les résultats sont montrés en figure 13.2. Pour les deux espèces, une conséquence est que les traces simulées sont plus concentrées vers des éléments d'intérêt autour de la nouvelle route. En parallèle à ce constat, les points pour le renard sont toujours denses dans la zone urbanisée qui contient un grand nombre de bâtiments et de zones arborées. Pour le chevreuil, les traces se concentrent autour de la route surtout vers la zone urbanisée à l'ouest. La zone bâtie au nord de la route est moins parcourue par rapport aux résultats sur le site non modifié. *La route ralentit logiquement l'accès aux zones d'intérêt situées de l'autre côté de la route.*

Figure 13 : (1) Site d'étude avec la création d'une nouvelle route fictive. (2) Résultats de simulation agent pour le renard et le chevreuil.



74

Pour compléter le scénario d'aménagement, nous avons ajouté trois passages à faune fictifs le long de la nouvelle route. Les passages sont modélisés par des coupures dans le tracé de la route. Des zones arborées supplémentaires menant aux passages représentent des corridors écologiques. D'après les simulations lancées, les passages favorisent la circulation des agents, même si aucun comportement d'apprentissage n'est implémenté. Les agents empruntent en effet les zones arborées aménagées autour de l'obstacle puis traversent celui-ci au niveau de coupures dans la voie. La distance moyenne entre les origines et les objectifs est proche de celle du scénario de référence (6,9 km) alors qu'elle avait diminué avec la construction de la route (6,5 km). De même, les déplacements sont à nouveau favorisés au nord de la nouvelle route avec la création de corridors alors qu'ils étaient davantage confinés au sud, dû à la présence de la route. *Ces résultats semblent indiquer l'efficacité accrue des passages à faune lorsqu'ils*

sont intégrés dans un corridor écologique. Cette analyse peut permettre ensuite de tester le meilleur emplacement d'un passage à faune sur un territoire, en évaluant celui qui optimise le nombre de traversées.

6. Conclusion et discussion

6.1. Discussion sur l'approche et les résultats du modèle de simulation

- 75 En aménagement du territoire, évaluer les effets des projets en amont de leur réalisation représente un enjeu. Les modifications de l'espace ont un impact sur les déplacements des espèces animales et celles-ci agissent en retour sur leur environnement spatial et sur les autres espèces. Pour limiter le rôle de certains obstacles, des aménagements en faveur de la circulation de la faune sont mis en place : des infrastructures ponctuelles comme des passages à faune, ou sur une plus grande emprise une continuité de milieux favorables. Néanmoins, l'utilisation effective par les animaux de ces aménagements est délicate à estimer. Par exemple, des relevés d'empreintes sont effectués afin d'estimer la fréquentation des passages à faune (APRR, 2009). L'apport pour l'ensemble des populations animales et de l'écosystème reste difficile à qualifier. Nous avons proposé un modèle agent afin de représenter l'influence de l'espace sur les déplacements. Cette modélisation est orientée objet, c'est-à-dire que les individus et les éléments du paysage sont considérés séparément. Cela nous a permis de *modéliser des comportements individuels, notamment la perception de l'environnement et la réponse apportée face à des obstacles ou à des lieux d'intérêt, ce qui est intéressant dans l'aide à la décision en aménagement.* Il demeure néanmoins difficile de prendre en compte cette variabilité individuelle dans des déplacements simulés. En effet les déplacements sont construits à partir de comportements communs auxquels nous avons ajouté une part d'aléatoire. De plus, les individus peuvent s'adapter différemment à des modifications dans leur environnement. L'intégration de comportements-types dans la simulation permet pourtant de lancer un grand nombre de simulations. La possibilité d'émergence de lieux favorables aux déplacements ou au contraire représentant une barrière reste intéressante. Plusieurs travaux correspondent à cette approche individu-centrée pour simuler des déplacements de dispersion (Vuilleumier et Metzger, 2006 ; La Morgia *et al.*, 2011). Par contre, la représentation de l'espace est différente de celle de notre modèle. Dans Vuilleumier et Metzger (2006), les éléments du paysage sont implémentés sous forme de graphe et les choix de direction dépendent des intersections avec les divers éléments obstacles ou intéressants pour le déplacement. Dans La Morgia *et al.* (2011), qui étudie la reconquête d'un territoire par une espèce, l'espace est parcouru selon une matrice de coût de déplacement. Ceci permet un calcul plus rapide des trajectoires par rapport à notre approche de considération du voisinage spatial local à chaque localisation de l'individu.
- 76 Notre modèle considère en entrée les données de description de l'espace non interprétées a priori. C'est l'agent qui interprète son environnement en fonction de son espèce et de ses propriétés individuelles. Nous y voyons l'avantage d'intégrer directement des données disponibles à grande échelle. Cette précision spatiale permet de considérer des petites taches paysagères qui peuvent jouer un rôle favorable dans les liens entre les zones d'habitat, mais qui peuvent être omises lors d'analyses uniquement structurelles du paysage ou d'analyses davantage fonctionnelles sur de larges territoires. Notre approche agent se positionne ainsi en complément des analyses de connectivité du paysage, qui détermine par exemple des graphes paysagers à partir des zones favorables à la faune et des obstacles, comme proposé par Foltête *et al.* (2012). Nous avons au préalable étudié l'espace fonctionnel utilisé par les animaux à partir de points GPS. La comparaison à l'aide d'indicateurs entre les résultats de simulation et les traces enregistrées permet de valider le modèle. *Le réalisme et la cohérence des traces simulées ont également pu être évalués par visualisation sur une carte identique à celle exploitée lors des analyses de données.*

6.2. Retour sur les données géographiques et perspectives d'enrichissements du modèle

- 77 Dans cet article, nous nous sommes intéressées à l'analyse et la modélisation des données géographiques et des déplacements d'animaux. *Nous avons pu constater la pertinence de l'utilisation des données à grande échelle. L'analyse de déplacements observés nous a permis de mettre en évidence des comportements spatiaux, cohérents avec la littérature, et que nous avons ensuite modélisés.* Nous avons pu, grâce aux relevés GPS, identifier des rythmes et des préférences spatiales des individus, en parallèle de la littérature sur le comportement des espèces. Les résultats ont été interprétés dans le contexte des sites d'étude correspondant à un milieu particulier. Ces résultats sont dépendants de l'exhaustivité et de la précision des données de description de l'espace. Ils pourraient être améliorés par des suivis d'animaux supplémentaires et par une description enrichie de l'espace.
- 78 L'analyse de cas d'étude – nombre d'individus restreint, emprises géographiques limitées – pose le problème de l'adéquation entre les données disponibles et les faits analysés. En effet, nous cherchons à évaluer les conséquences d'aménagements sur les déplacements de la faune. Cependant, les renards, les chevreuils et les cerfs parcourent leurs domaines vitaux au long de l'année et leurs déplacements à l'extérieur de cet espace sont plus exceptionnels. Les couloirs de déplacement potentiellement identifiables à partir des déplacements quotidiens concernent alors des passages empruntés et accentués par les animaux sur leur territoire. Ces lieux de passage peuvent par ailleurs être difficiles à déduire à partir de localisations enregistrées ponctuellement, qui ne couvrent généralement pas le temps de déplacement dans des coulées plus ou moins longues.
- 79 D'autres bases de données de description de l'espace que la BD TOPO® pourraient être intéressantes, comme les images aériennes et satellitaires permettant de détailler le type de végétation, et les données sur les prairies et les cultures du Référentiel parcellaire graphique. Le modèle de simulation pourrait être enrichi par ces informations complémentaires sur l'espace et par l'identification d'autres relations entre les déplacements et les éléments du paysage. Des dérangements autres – piétons, trafic en temps réel, opportunités de ressources – ne peuvent pas être incluses dans les analyses de données. Par contre, une perspective serait de prendre en compte les interactions sociales intra et inter-espèces, volontairement laissées de côté pour cibler l'implémentation sur la réponse des individus face aux obstacles ou aux lieux d'intérêt. Une variabilité individuelle plus grande pourrait également être intégrée dans l'appréhension de l'espace, par exemple via la notion d'apprentissage, pour modéliser une connaissance accrue du territoire par les animaux. Nous envisageons ensuite de tester l'adaptation du modèle à d'autres espèces avec des capacités de déplacement différentes que celles du renard et des cervidés.

Bibliographie

- Amand B., Duponteil A., Strosser P., Boos M., 2012, *Élaboration du plan national d'actions en faveur du hamster commun en Alsace pour la période 2012-2016. Sixième projet de Plan National d'Actions en faveur des espèces*, MEDDE, Document pour la consultation nationale, ACTeon et NATURACONST@.
- Amsallem J., Deshayes M., Bonneville M., 2010, « Analyse comparative de méthodes d'élaboration de trames vertes et bleues nationales et régionales », *Irstea, Sciences, Eaux et Territoires*, vol. 3, 40-45.
- Anwar S.M., Jeanneret C.A., Parrott L., Marceau D.J., 2007, « Conceptualization and implementation of a multi-agent model to simulate whale-watching tours in the St-Lawrence Estuary in Quebec, Canada », *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, 1775-1787.
- APRR, 2009, *L'utilisation des passages à faune de l'autoroute A39. Résultats, analyses et perspectives août 2004–avril 2009*, Rapport APRR et Fédération départementale des chasseurs du Jura.
- Baltzinger C., 2003, *Sélection des sites de repos par le Cerf (Cervus elaphus L.) et le Chevreuil (Capreolus capreolus L.) vivant en sympatrie en forêt tempérée de moyenne montagne*, Thèse de doctorat, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts.
- Bennett A. F., 2003, *Linkages in the Landscape: The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*, International union for conservation of nature, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

- Blanc N., Glatron S., Schmitt G., 2012, « Trames vertes urbaines : recherches en sciences humaines et sociales », *Développement durable et territoires*, vol. 3, No.2, Url : <http://developpementdurable.revues.org>.
- Bonnin M., 2008, *Les corridors écologiques. Vers un troisième temps du droit de la conservation de la nature ?*, L'Harmattan, Paris.
- Brasebin M., 2009, « GeOxygene: An Open 3D Framework for the Development of Geographic Applications », *12th International Conference on Geographic Information Science (AGILE'09)*, 2-5 juin 2009, Hanovre.
- Burel F., Baudry J., 1999, *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*, Éditions TEC & DOC, Lavoisier, Paris.
- Cohen M., 2012, « Biodiversité et mondialisation : une relation ambiguë », in Ghorra-Gobin C. (dir.), *Dictionnaire des mondialisations*, Édition Armand-Colin, Paris, 2^e édition, 82-87.
- Cosson J.-F., Estoup A., Coulon A., Galan M., Mortier F., Hewison A. J. M., Guillo G., 2006, « Un modèle géostatistique pour la détection et la localisation des discontinuités génétiques spatiales entre populations », *Les actes du BRG*, vol. 6, 41-55.
- Dugdale S.J., Lovett A.A., Watkinson A.R., Atkinson P.W., 2009, « Historical analysis of habitat associations with intra-guild richness hotspots for farmland birds: clues for the successful deployment of agri-environment schemes », *Proceedings of GISRUUK 2009*, 131-134.
- Ethier K., Fahrig L., 2011, « Positive effects of forest fragmentation, independent of forest amount, on bat abundance in eastern Ontario, Canada », *Landscape Ecology*, vol. 26, 865-876.
- Godet L., 2010, « La 'nature ordinaire' dans le monde occidental », *L'Espace géographique*, vol. 39, No.4, 295-308.
- Ferber J., 1995, *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, InterÉditions, Paris.
- Foltête J.-C., Clauzel C., Vuidel G., 2012, « A software tool dedicated to the modelling of landscape networks », *Environmental Modelling & Software*, vol. 38, 316-327.
- Fryxell J.M., Hazell M., Börger L., Dalziel B.D., Haydon D.T., Morales J.M., McIntosh T., Rosatte R.C., 2008, « Multiple movement modes by large herbivores at multiples spatiotemporal scales », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, No.49, 19114-19119.
- Gould J.L., 2002, « Can honey bees create 'cognitive maps' ? », in Bekoff M., Allen C., Burghardt G. M. (eds), *The Cognitive Animal: Empirical and Theoretical Perspectives on Animal Cognition*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 41-45.
- Harris S., Rayner J.M.V., 1986, « Urban Fox (*Vulpes vulpes*) Population Estimates and Habitat Requirements in Several British Cities », *Journal of Animal Ecology*, vol. 55, No.2, 575-591.
- Héritier S., Moumaneix C., 2007, « Protection et gestion dans les parcs nationaux canadiens et états-unis. Quelques enjeux actuels », *Cahiers de géographie du Québec*, vol. 51, No.143, 155-176.
- Jacobson A.R., Provenza A., Von Hardenberg A., Bassano B., Festa-Bianchet M., 2004, « Climate forcing and density dependence in a mountain ungulate population », *Ecology*, vol. 85, 1598-1610.
- Jewett T.J., Lawrence R.L., Marshall L., Gessler P.E., Scott L.P., Shannon L.S., 2011, « Spatiotemporal relationships between climate and whitebark pine mortality in the Greater Yellowstone Ecosystem », *Forest Science*, vol. 57, 320-335.
- Kallmann M., 2005, « Path planning in triangulations », *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 31 juillet 2005, Édimbourg, Écosse, 49-54.
- Krojerova-Prokesova J., Barancekova M., Sustr P., Heurich M., 2010, « Feeding patterns of red deer *Cervus elaphus* an altitudinal gradient in the Bohemian Forest: effect of habitat and season », *Wildlife Biology*, vol. 16, No.2, 173-184.
- La Morgia V., Malenotti E., Badino G., Bona F., 2011, « Where do we go from here? Dispersal simulations shed light on the role of landscape structure in determining animal redistribution after reintroduction », *Landscape Ecology*, vol. 26, 969-981.
- Landmann G., Dupouey J.-L., Badeau V., Lefevre Y., Bréda N., Nagaleisen L.-M., Chuine I., Lebourgeois F., 2008, « Le hêtre face aux changements climatiques », *Forêt-entreprise*, vol. 180, 28-33.
- MacArthur R.H., Wilson E.O., 1963, « An equilibrium theory of insular zoogeography », *Evolution*, vol. 17, No.4, 373-387.
- Marsh D.M., Milam G.S., Gorham N.P., Beckam N.G., 2005, « Forest Roads as Partial Barriers to Terrestrial Salamander Movement », *Conservation Biology*, vol. 19, No.6, 2004-2008.

- McGregor R.L., Bender D.J., Fahrig L., 2008, « Do small mammals avoid roads because of the traffic? », *Journal of Applied Ecology*, vol. 45, 117-123.
- McKinney M.L., 2006, « Urbanization as a major cause of biotic homogenization », *Biological Conservation*, vol. 127, 247-260.
- Mechoud S., Hill D.R.C., Campos A., Orth D., Carrere P., Micol D., Poix C., Michelin Y., Coquillard P., Dumont B., 2000, « Simulation Multi-Agents de l'entretien du paysage par des herbivores en moyenne montagne », *Publications scientifiques et techniques de l'IRSTEA*, Url : <http://www.lisc.clermont.cemagref.fr/>.
- Meia J.-S., 1994, *Organisation sociale d'une population de renards (Vulpes vulpes) en milieu montagnard*, Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, Suisse.
- MEDDTL, 2009, « Les études d'impacts de projets de travaux ou d'ouvrages », Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Url : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>.
- Mergey M., 2007, *Réponses des populations de martres d'Europe (Martes martes) à la fragmentation de l'habitat : mécanismes comportementaux et conséquences*, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- MIRO, 2006, « Modélisation Intra-Urbain des rythmes quotidiens, Rapport d'étape numéro 2, année 2005-2006, Génération d'une population 'synthétique' d'agents », *Rapport PREDIT 2002-2006*.
- ONCFS, 2013, « Ressources bibliographiques sur les espèces animales », *Office national de la chasse et de la faune sauvage*, Url : <http://www.oncfs.gouv.fr/>.
- Pellissier V. Cohen M., Boulay A., Clergeau P., 2012, « Birds are also sensitive to landscape composition and configuration within city centre », *Landscape and Urban Planning*, vol. 104, 181-188.
- Pouille M.-L., 1991, *Eco-éthologie du renard roux en Lorraine*, Thèse de doctorat, Université de Strasbourg I.
- Robardet E., 2007, *Étude de la transmission d'Echinococcus multilocularis dans une grande agglomération : influence du comportement alimentaire et de l'utilisation de l'espace par le renard roux (Vulpes vulpes) sur la contamination de l'environnement*, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- Storms D., Aubry P., Hamann J.-L., Saïd S., Fritz H., Saint-Andrieux C., Klein F., 2008, « Seasonal variation in diet composition and similarity of sympatric red deer Cervus elaphus and roe deer Capreolus capreolus », *Wildlife Biology*, vol. 14, No.2, 237-250.
- Saïd S., Gaillard J.-M., Duncan P., Guillon N., Guillon N., Servanty S., Pellerin M., Lefevre K., Martin C., Van Laere G., 2005, « Ecological correlates of home-range size in spring-summer for female roe deer (Capreolus capreolus) in a deciduous woodland », *Journal of Zoology*, vol. 267, 301-308.
- Saïd S., 2008, *Ongulés sauvages et équilibre forêt-gibier*, Rapport scientifique Office national de la chasse et de la faune sauvage.
- Spaccapietra S., Parent C., Damiani M.L., Macedo J.A (de), Porto F., Vangenot C., 2008, « A conceptual view on trajectories », *Data & Knowledge Engineering*, vol. 65, No.1, 126-146.
- Papastamatiou Y.P., Cartamil D.P., Lowe C.G., Meyer C.G., Wetherbee B.M., Holland K.N., 2011, « Scales of orientation, directed walks and movement path structure in sharks », *Journal of Animal Ecology*, vol. 80, No.4, 864-874.
- Tolman E.C., 1948, « Cognitive maps in rats and men », *Psychological Review*, vol. 55, No.4, 189-208.
- Treuil J.-P., Drogoul A., Zucker J.-D., 2008, *Modélisation et simulation à base d'agents. Exemples commentés, outils informatiques et question théoriques*, Dunod Edition, Sciences Sup and IRD, Paris.
- Veyret Y., Simon L., 2006, « Biodiversité, développement durable et Géographie », *Annales des Mines*, No.44, 76-83.
- Von Uexküll J., 1934, *Mondes animaux et monde humain*, Édition Denoël, Paris.
- Vuilleumier S., Metzger R., 2005, « Animal dispersal modelling: Handling landscape features and related animal choices », *Ecological Modelling*, vol. 190, 159-170.

Pour citer cet article

Référence électronique

Laurence Jolivet, Marianne Cohen et Anne Ruas, « Évaluation des conséquences d'aménagements d'infrastructures sur les déplacements d'animaux. Définition et expérimentation d'un modèle de

simulation agent », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 712, mis en ligne le 21 février 2015, consulté le 13 mai 2015. URL : <http://cybergeo.revues.org/26767> ; DOI : 10.4000/cybergeo.26767

À propos des auteurs

Laurence Jolivet

Laboratoire COGIT, IGN, laurence.jolivet@ign.fr

Marianne Cohen

Université Paris Sorbonne, UMR ENEC, Marianne.Cohen@paris-sorbonne.fr

Anne Ruas

Laboratoire COSYS-LISIS, IFSTTAR, anne.ruas@ifsttar.fr

Droits d'auteur

© CNRS-UMR Géographie-cités 8504

Résumés

Les éléments du paysage influencent les déplacements de la faune. Pour identifier les obstacles et les lieux favorables au passage, les études s'appuient sur des suivis de localisations d'animaux ainsi que sur des données de description de l'environnement spatial. L'objectif de cette recherche est de simuler des déplacements d'animaux dans l'espace, en situation connue puis modifiée par des aménagements. Une première étape est l'analyse des déplacements observés et de l'influence des éléments du paysage sur trois espèces : le renard, le chevreuil et le cerf. En fonction de ces espèces et du type du milieu d'étude, périurbain ou forestier, l'appréhension des routes est différente, de même que les zones arborées qui peuvent représenter des lieux de refuge ou des ressources. Les résultats d'analyses de données et les connaissances sur les espèces sont intégrés dans un modèle de simulation de déplacements orienté agent, défini dans une deuxième étape. Les trajectoires sont construites en prenant en compte le comportement spatial des espèces et la caractérisation des obstacles et des éléments favorables aux déplacements. Nous lançons dans une troisième étape la construction de trajectoires sur une zone modifiée par l'aménagement d'une route et nous en évaluons les conséquences. Le modèle tend à confirmer l'effet de barrière d'une grande infrastructure de transport, cet effet étant diminué avec la mise en place d'un corridor écologique. Alors que la route a pour conséquence de limiter les déplacements, le corridor favorise le parcours de l'espace et permet des traversées en des points précis. Ces résultats montrent l'intérêt d'un modèle afin de prévoir l'efficacité de nouvelles mesures de préservation de la faune sauvage, telle la Trame verte bleue.

Assessment of the consequences of infrastructures on fauna movements. Definition and experimentation of an agent-based model for simulation

Landscape elements influence fauna movements. The information is collected so that to identify obstacles and interesting corridors: locations of animals and topographical databases describing the spatial environment. The aim of this research is to simulate fauna movement into spatial areas, both in a real context then in a context modified by infrastructures. We start by analysing the collected movement data and the influence of landscape elements on three species: the red fox, the roe deer and the red deer. The perception of space is different, depending on the species and on the type of environment. As an example, wooded area can be either used for resting or foraging. Then the results of data analyses and knowledge on the species are integrated in a simulation model based on agents. Trajectories are built by taking into account the spatial behaviour of species and the characterization of both obstacles and movement corridors. We finally test the simulation process on a modified area with a road

and wildlife infrastructures. We assess the consequences on movements. The model tends to confirm the barrier effect of the motorway even if the effect is reduced by ecological corridors. While the road limits animals' movements, the corridor favours spatial accessibility and leads to crossings at precise locations. These results highlight the interest of a model in order to assess the efficacy of wildlife preservation such as the measure of "Trame verte et bleue".

Entrées d'index

Mots-clés : déplacement, faune, espace fonctionnel, simulation, données géographiques

Keywords : movement, fauna, functional space, simulation, geographical data